

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Utilização de Geradores de Ímanes Permanentes em Aproveitamentos de Energia Renovável

Mário Tomé Correia Chaves

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Professor Doutor Artur Manuel Figueiredo Fernandes Costa

Junho de 2013

Resumo

A atual preocupação com o meio ambiente é cada vez maior, assim como a incessante procura de soluções alternativas ao desenvolvimento das tecnologias de aproveitamentos para energias renováveis.

A utilização de geradores de ímanes permanentes revela-se uma solução viável ao desenvolvimento de diversas tecnologias que utilizam geradores síncronos e assíncronos, estando estes em crescente nível de potência de utilização em diversos aproveitamentos. A realização de um trabalho deste tipo contribui deste modo para a otimização do desenvolvimento de diversas tecnologias de aproveitamentos de energias renováveis, garantindo uma melhoria do sistema não só em nível de fiabilidade como também de economia, em prol de um melhor futuro.

O objetivo desta dissertação oferece informação acerca do panorama global dos geradores de ímanes permanentes, dos aproveitamentos de produção de energia através de fontes não convencionais, disponíveis, e dentro destes, dar ênfase à temática e das energias renováveis.

A dissertação é dividida em duas partes, sendo que na primeira parte do trabalho é realizado um estudo atualizado sobre as diferentes soluções tecnológicas ao nível de geradores elétricos que são utilizados em aproveitamentos de energias renováveis para a produção de energia elétrica, com especial foco para as soluções que se baseiam em geradores síncronos de ímanes permanentes.

Na segunda parte deste trabalho é apresentado e analisado um trabalho experimental nos laboratórios de máquinas elétricas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto com vista à caracterização do funcionamento de um gerador síncrono de ímanes permanentes.

Palavras-Chave: Energias Renováveis, Aproveitamentos de Energias Renováveis, Produção de Energia, Geradores Elétricos, Geradores Síncronos de Ímanes Permanentes.

Abstract

The current concern with the environment is growing, and the search for alternative solutions to the development of technologies for renewable energy utilization is incessant.

The research and use of permanent magnet synchronous generators proves to be a viable solution to the development of different kinds of technologies that use synchronous and asynchronous generators. This kind of generators has one increasing power level of use in many types of renewable energy. The performance of his work contributes in this way to optimize the development of several technologies, ensuring improvement of the system not only at the level of reliability as well as economically, towards a better future.

This document aims to give information about the overall outlook of permanent magnet generators, production of power through non-conventional sources, and within these, to emphasize the theme of renewable energy.

This dissertation is divided into two parts, where the first part of the work is a study conducted to date on the different technological solutions of the electrical generators that are used in different kinds of electricity production by renewable energy, with a special focus on the solutions that are based on permanent magnet synchronous generators.

In the second part of this work was performed one experimental work in laboratories of electrical machines of the Faculty of Engineering of Porto University, for the characterization of the operation of a permanent magnet synchronous generator.

Keywords: *Renewable Energy, Utilization of Renewable Energy, Energy Production, Electric Generators, Permanent Magnet Synchronous Generators.*

Agradecimentos

A realização desta Dissertação só foi possível graças à ajuda, apoio e colaboração de forma direta ou indireta de várias pessoas às quais gostava de agradecer e reconhecer a disponibilidade manifestada:

Ao Prof. Doutor Artur Costa, pelo seu espírito crítico, rigor, oportunos conselhos, comentários e sugestões na revisão do texto, sem esquecer o incansável apoio e disponibilidade, assim como a simpatia, confiança e cordialidade demonstradas no constante acompanhamento ao longo da orientação da dissertação, tornadas num estímulo motivador e decisivo em certos momentos.

Ao Engenheiro Pinheiro Jorge por toda a sua disponibilidade e apoio demonstrado na ajuda e esclarecimento de dúvidas acerca da realização da segunda parte do trabalho no laboratório de Máquinas Elétricas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Aos meus pais pelo sacrifício suportado durante os cinco anos de curso e pelo constante apoio durante esta etapa.

À minha namorada Ana, pela paciência e compreensão dedicada ao longo da realização do trabalho.

A todos os meus amigos pelos momentos de amizade e companheirismo demonstrados.

A todos, um muito obrigado.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Índice	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Abreviaturas e Símbolos	xix
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 - Enquadramento	1
1.2 - Objetivos e metodologia	3
1.3 - Estrutura	4
Capítulo 2 Energias Renováveis	5
2.1 - Introdução	5
2.2 - Cenários Energéticos - O paradigma do passado.....	6
2.3 - Energias Renováveis	8
2.3.1 - Energia Geotérmica	8
2.3.1.1 - Contexto Internacional	8
2.3.1.2 - Em Portugal	9
2.3.2 - Energia Biomassa	11
2.3.2.1 - Contexto Internacional	11
2.3.2.2 - Em Portugal	12
2.3.3 - Energia Hidrogénio	12
2.3.4 - Energia Maremotriz	13
2.3.4.1 - Contexto Internacional	14
2.3.4.2 - Em Portugal	14
2.3.5 - Energia Hídrica	15
2.3.5.1 - Contexto Internacional	15
2.3.5.2 - Em Portugal	16
2.3.6 - Energia Solar	17
2.3.6.1 - Contexto Internacional	18
2.3.6.2 - Em Portugal	18
2.3.7 - Energia Eólica	19
2.3.7.1 - Contexto internacional	20
2.3.7.2 - Portugal	20

2.4 - Políticas Energéticas	21
2.5 - Cenários Energéticos - Os novos paradigmas.....	23
2.6 - Sínteses e conclusões	23
Capítulo 3 Tecnologias para aproveitamentos de energias renováveis	25
3.1 - Introdução.....	25
3.2 - Soluções e tecnologias por tipo de fonte primária	25
3.2.1 - Energia Hídrica	27
3.2.1.1 - Rios/Lagos.....	27
3.2.1.2 - Marés, Ondas e Correntes	31
3.2.1.3 - Energia térmica dos oceanos.....	33
3.2.1.4 - Energia das Ondas.....	34
Aquabuoy	35
Pelamis	36
Archimedes Wave Swing.....	37
WaveRoller	38
3.2.2 - Energia Eólica.....	39
3.2.2.1 - Tipos de Turbinas	41
3.2.3 - Biomassa.....	43
3.2.4 - Outras	44
3.2.4.1 - Energia Geotérmica.....	44
3.2.4.2 - Fuel Cells / Pilhas de Combustível.....	45
3.2.4.3 - Energia Solar	46
3.3 - A escolha do gerador	47
3.3.1 - Geração por corrente contínua.....	47
3.3.2 - Geração por corrente alternada.....	48
3.3.3 - A escolha do gerador na energia eólica.....	49
3.3.4 - A escolha do gerador na energia hídrica.....	53
3.3.4.1 - Rios/Lagos.....	53
3.3.4.2 - Marés, Ondas e Correntes	55
3.3.4.3 - Biomassa e outros.....	56
3.4 - Conclusão	58
Capítulo 4 Geradores de Ímanes Permanentes	59
4.1 - Introdução.....	59
4.2 - Aspetos particulares que valorizam o Gerador de Ímanes Permanentes.....	60
4.3 - Constituição e variantes construtivas	61
4.3.1 - Estator	62
4.3.2 - Entreferro	63
4.3.3 - Rotor	64
4.3.3.1 - Topologia Circunferencial	64
4.3.3.2 - Topologia Radial	65
4.3.3.3 - Topologia com ímanes embutidos (Interior)	66
4.3.3.4 - Topologia com ímanes na superfície do rotor (Periférica)	66
4.3.3.5 - Disposição em pinça (garra polar)	67
4.3.4 - Os ímanes permanentes	67
4.3.5 - Gaiola Rotórica	69
4.4 - Funcionamento	70
4.5 - Modelização.....	72
4.6 - Síntese do capítulo	76
Capítulo 5 Investigação Experimental sobre um Gerador de Ímanes Permanentes. 77	
5.1 - Introdução.....	77

5.2 - Caraterização do processo experimental	78
5.3 - Atividade Experimental	81
5.3.1 - Determinação dos valores da resistência estatórica	81
5.3.2 - Determinação do valor da força eletromotriz, E_o	82
5.3.3 - Determinação do valor da temperatura após ensaio em vazio.....	85
5.3.4 - Análise da forma de onda da força eletromotriz em vazio e constituição harmónica para 3 velocidades	86
5.3.5 - Ensaio com o gerador funcionando em modo isolado.....	87
5.3.5.1 - Ensaio com o gerador funcionando em modo isolado com carga óhmica.....	89
5.3.5.2 - Ensaio com o gerador funcionando em modo isolado com carga indutiva	93
5.3.5.3 - Ensaio com o gerador funcionando em modo isolado com carga capacitiva.....	97
5.3.5.4 - Ensaio em funcionamento paralelo à rede	101
5.4 - Sínteses e Conclusões	109
Capítulo 6 Conclusões.....	111
Referências	115
Anexos	123
Anexo A Ensaio para a determinação da força eletromotriz	124
Anexo B Ensaio em carga óhmica, com o gerador funcionando em modo isolado	125
Anexo C Ensaio em carga indutiva com o gerador funcionando em modo isolado	127
Anexo D Ensaio em carga capacitiva com o gerador funcionando em modo isolado	129
Anexo E Ensaio do gerador em paralelo com a rede	131

Lista de Figuras

Figura 2.1: Consumo mundial de eletricidade em função da tecnologia energética. [2]	7
Figura 2.2: Emissões mundiais de dióxido de carbono em função do tipo de combustível. [2]	7
Figura 2.3: Evolução da exploração da Central Geradora Ribeira Grande e Central Geradora Pico Vermelho [6]	10
Figura 2.4: Consumo mundial energia Hidroelétrica (toneladas equivalentes de petróleo). [13]	15
Figura 2.5: Potencial hídrico por aproveitar e dependência energética externa nacional. [14]	16
Figura 2.6: Tipos de sistemas fotovoltaicos e utilizações. [15]	17
Figura 2.7: Concentração da energia fotovoltaica no mundo (2009). [16]	18
Figura 2.8: Concentração da energia fotovoltaica no mundo (2011). [16]	18
Figura 2.9: Índice de irradiação global na Europa. [17]	19
Figura 2.10: Consumo de energia primária a nível mundial, por fonte energética. [21]	23
Figura 3.1: Organização de um sistema elétrico de energia. [22]	26
Figura 3.2: Queda útil de uma central hidroelétrica. [25]	28
Figura 3.3: Esquema de aproveitamento a fio-de-água. [25]	28
Figura 3.4: Esquema e constituintes de uma central do tipo albufeira. [24]	29
Figura 3.5: Esquema Turbina tipo Pelton. [26]	30
Figura 3.6: Esquema turbina tipo Francis. [26]	30
Figura 3.7: Esquema turbina tipo Kaplan. [26]	31
Figura 3.8: Esquema de funcionamento de uma barragem de marés. [27]	32
Figura 3.9: Comparação de uma turbina eólica offshore com uma turbina subaquática para a produção de energia através das marés. [29]	33

Figura 3.10: Formas de extração de energia através das ondas. [32].....	34
Figura 3.11: Esquema de funcionamento do sistema com coluna de ar oscilante. [33]	35
Figura 3.12: Modelo de funcionamento de um tipo de aproveitamento de corpo oscilante, AquaBoy.[34]	36
Figura 3.13: Ilustração do funcionamento do modelo Pelamis. [35]	37
Figura 3.14: Princípio de funcionamento do sistema AWS. [36]	37
Figura 3.15: Princípio funcionamento do WaveRoller. [37].....	38
Figura 3.16: Dispositivo Wave Dragon. [38].....	38
Figura 3.17: Nota histórica mediante a evolução dos aerogeradores. [39]	39
Figura 3.18: Escala de ruído de um aerogerador. [39].....	40
Figura 3.19: Diferentes turbinas de eixo vertical (Savonius e Darrieus). [40].....	42
Figura 3.20: Diversos constituintes de um aerogerador.	43
Figura 3.21: Diferentes formas de aproveitamento da biomassa. [41]	44
Figura 3.22: Processo eletroquímico que ocorre numa pilha de combustível. [43]	46
Figura 3.23: Diferentes soluções para geradores assíncronos [48]	50
Figura 3.24: Diferentes soluções em geradores síncronos [48].....	51
Figura 3.25: Comparação da diferente tecnologia eólica. [31]	52
Figura 4.1: Configuração de um rotor com os ímanes permanentes inclinados. [57]	63
Figura 4.2:Configuração rotórica circunferencial. [57].....	65
Figura 4.3: Configuração rotórica radial. [57]	65
Figura 4.4: Configuração rotórica interior. [57]	66
Figura 4.5: Configuração rotórica periférica. [57]	66
Figura 4.6: Configuração rotórica em pinça. [57]	67
Figura 4.7: Curvas de desmagnetização e do produto energético de alguns materiais magnéticos. [57]	68
Figura 4.8: Diagrama fasorial do modelo de blondel. [55].....	72
Figura 5.1:Esquema de montagem da medição dos valores da resistência estatórica.	79
Figura 5.2: Representação do Layout utilizado.	80
Figura 5.3: Esquema de montagem do método voltímetro-amperímetro.	81
Figura 5.4: esquema de montagem para a determinação da força eletromotriz.	83

Figura 5.5: Variação do valor da força eletromotriz aos terminais do gerador com a velocidade.	84
Figura 5.6: Representação gráfica da potência mecânica desenvolvida em função da velocidade.	84
Figura 5.7: Representação de diferentes valores do Binário em função da velocidade.	85
Figura 5.8: Análise da forma de onda da tensão aos terminais do gerador para 50Hz (à esquerda) e análise ao espectro harmónico para a mesma situação (à direita)	86
Figura 5.9: Análise da forma de onda da tensão aos terminais do gerador para 40Hz (à esquerda) e análise ao espectro harmónico para a mesma situação (à direita)	87
Figura 5.10: Análise da forma de onda da tensão aos terminais do gerador para 60Hz (à esquerda) e análise ao espectro harmónico para a mesma situação (à direita)	87
Figura 5.11: Esquema de montagem com carga óhmica.	90
Figura 5.12: Representação gráfica da alteração dos valores da tensão em função do fator de carga.	90
Figura 5.13: Representação gráfica da alteração do valor das potências e perdas com o fator de carga.	91
Figura 5.14: Representação gráfica dos diferentes tipos de perdas e alteração com o fator de carga.	91
Figura 5.15: Alteração do valor do rendimento para diferentes fatores de carga.	92
Figura 5.16: Alteração dos valores do fator de potência para diferentes valores de fator de carga.	93
Figura 5.17: Esquema de montagem com carga indutiva.	94
Figura 5.18: Gráfico que representa o comportamento da tensão com a alteração do fator de carga.	95
Figura 5.19: Gráfico que representa o comportamento da potência reativa com o fator de carga.	95
Figura 5.20: Gráfico que representa o comportamento dos valores do fator de potência com o fator de carga.	96
Figura 5.21: Comportamento das potências e das perdas com alteração do fator de carga. ..	96
Figura 5.22: Valores obtidos para o rendimento com a alteração do fator de carga.	97
Figura 5.23: Esquema utilizado para o ensaio com carga capacitiva.	98
Figura 5.24: Alteração da tensão com o fator de carga no ensaio com carga capacitiva.	99
Figura 5.25: Comportamento da potência reativa fornecida ao gerador com o fator de carga.	99
Figura 5.26: Comportamento dos valores das potências e das perdas com a alteração do fator de carga.	100
Figura 5.27: Comportamento do fator de potência com alteração do fator de carga.	100

Figura 5.28: Valores do rendimento obtidos para o ensaio com carga capacitiva.	101
Figura 5.29: Esquema de montagem do ensaio paralelo à rede.	103
Figura 5.30: Gráfico que representa a variação da potência ativa com o fator de carga.	104
Figura 5.31: Gráfico que ilustra o comportamento da potência reativa com alteração do fator de carga.	105
Figura 5.32: Gráfico que ilustra o comportamento da potência e das perdas com alteração do fator de carga.	105
Figura 5.33: Comportamento das perdas mediante alteração do fator de carga.	106
Figura 5.34: Gráfico que ilustra os valores de rendimento obtidos.	107
Figura 5.35: Comportamento do fator de potência com variação do fator de carga.	108
Figura 5.36: Comportamento da tensão aos terminais do gerador mediante alteração do fator de carga.	108

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Produção de Biomassa Florestal em Portugal [10]	12
Tabela 3.1: Diferentes geradores utilizados nos diversos aproveitamentos. [55]	56
Tabela 5.1: Tabela de características do gerador.	78
Tabela 5.2: Tabela de características da máquina primária.	79
Tabela 5.3: Características da carga resistiva utilizada.	80
Tabela 5.4: Características da carga indutiva utilizada.	80
Tabela 5.5: Características da carga capacitiva utilizada.	80
Tabela A 1: Valores obtidos no ensaio para a determinação do valor da força eletromotriz	123
Tabela B 1: Valores lidos no ensaio com carga óhmica.	124
Tabela B 2: Valores calculados no ensaio com carga óhmica.	125
Tabela C 1: Valores lidos no ensaio em carga indutiva.	127
Tabela C 2: Valores calculados no ensaio em carga indutiva.	128
Tabela D 1: Valores lidos no ensaio em carga capacitiva.	129
Tabela D 2: Valores calculados no ensaio com carga capacitiva.	130
Tabela E 1: Valores lidos no ensaio do gerador em paralelo com a rede.	131
Tabela E 2: Valores calculados no ensaio do gerador em paralelo com a rede.	132

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

AlNiCo	Alumínio-Níquel-Cobalto
Br	Remanência
CAO	Coluna de ar oscilante
CELE	Comércio Europeu de Licenças de Emissão de gases com efeito de estufa
CO ₂	Dióxido de Carbono
EDA	Eletricidade dos Açores
ENAAC	Estratégia Nacional de Adaptação as Alterações Climáticas
FACTS	<i>Flexible AC Transmission System</i>
f.e.m	Força eletromotriz, V
FPC	Fundo Português de Carbono
Hc	Campo coercivo, A/m
I&D	Investigação e Desenvolvimento
IEA	Internacional Energy Agency
tep	Tonelada equivalente de petróleo
NdFeB	Neodímio-Ferro-Boro
PNAC	Programa Nacional para as Alterações Climáticas
PNALE II	Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão
rpm	Rotações por Minuto
SmCo	Samário-Cobalto

Lista de símbolos

B	Valor eficaz da indução magnética, T
$\cos \varphi$	Fator de potência
D	Diâmetro interior do estator, m
E_o	Força eletromotriz em vazio, V
$E_{id.t}$	Força eletromotriz longitudinal de auto-indução em carga, V
$E_{iq.t}$	Força eletromotriz transversal de auto-indução em carga, V

f	Frequência, Hz
I_a	Intensidade de corrente da componente ativa, A
I_d	Intensidade de corrente no eixo longitudinal, A
I_q	Intensidade de corrente no eixo transversal, A
I_r	Intensidade de corrente da componente reativa, A
L	Comprimento axial do núcleo, m
m	Número de fases
n	Rotações por minuto, min^{-1}
N_e	Número total de espiras
P	Potência ativa, W
P_{mec}	Potência mecânica, W
P_{totais}	Perdas totais, W
P_{δ}	Potência ativa desenvolvida no entreferro, por fase, W
p	Número de pares de pólos
p_{mag}	Perdas magnéticas, W
p_{mec}	Perdas mecânicas, W
Q	Potência reativa, var
R	Resistência, Ω
$R_{T_{\text{amb}}}$	Resistência por fase do estator à temperatura ambiente, Ω
$R_{T_{\text{ref}}}$	Resistência por fase do estator para a temperatura de referência, Ω
S	Potência aparente, VA
T, T_{el}	Binário eletromagnético, N.m
T	Temperatura de funcionamento, $^{\circ}\text{C}$
T_{amb}	Temperatura ambiente, $^{\circ}\text{C}$
T_{ref}	Temperatura de referência para a classe de isolamento, $^{\circ}\text{C}$
U, v	Tensão, V
U_d	Tensão no eixo longitudinal, V
U_q	Tensão no eixo em quadratura, V
X_d	Reatância síncrona longitudinal, Ω
X_q	Reatância síncrona transversal, Ω
X_{md}	Reatância de magnetização longitudinal, Ω
X_{mq}	Reatância de magnetização transversal, Ω
X_{σ}	Reatância de fugas, Ω
\underline{Z}	Impedância, Ω
φ	Ângulo de fase, $^{\circ}$
δ	Ângulo de carga, $^{\circ}$

ω	Velocidade angular, rad/s
α	Coeficiente igual a 235 para enrolamentos em cobre
η	Rendimento

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Enquadramento

No século passado, a sociedade tornou-se altamente dependente do consumo de combustíveis fósseis e seus derivados, recursos que, para além de serem altamente poluidores e prejudiciais para o ambiente, são alvo constante de especulação de mercado e súbitas alterações de preços, com sobrevalorização dos mesmos, devido à existência de crises políticas e económicas.

A crescente intensificação dos consumos de energia eléctrica está de forma directa ligada a este assunto e é encarada como uma das principais razões para a intensificação do consumo e para a consequente diminuição das reservas de combustíveis fósseis, aspeto que justifica a pressão para a procura de formas alternativas de produção de energia eléctrica, eficientes e menos poluidoras.

As fortes preocupações sobre a redução dos consumos de combustíveis fósseis levou à existência de uma mudança de mentalidades sobre a forma como se produz e se consome energia eléctrica.

Virando as atenções para o caso português, o nosso país possui escassos recursos fósseis, estando dependente da importação exterior destes combustíveis. Face a isto, e observando a localização geográfica do país, com os maiores índices de irradiância solar comparativamente com o resto da Europa, a invejável orla costeira e recursos hídricos existentes, assim como o forte vento que se faz sentir em certas regiões, existem excelentes oportunidades para o investimento em diferentes formas de produção de energia através de energia renovável, e na sua diversificação, levando a uma diminuição da forte dependência externa no que toca ao recurso energia, aparecendo assim uma boa aposta para o melhoramento da economia interna do país e do meio ambiente, contribuindo-se também, a médio prazo, para o cumprimento dos objetivos acordados no Protocolo de Quioto.

O investimento na produção de energia renovável gera a necessidade de amadurecer tecnologias já utilizadas e não tão fortemente desenvolvidas, e de investigar o surgimento de novas formas de aproveitamento, de modo a originar melhores estatísticas e novos postos de emprego.

Para o desenvolvimento e amadurecimento das tecnologias renováveis é essencial a utilização de medidas de eficiência energética. E, nos dias que correm, a procura pela utilização destas medidas levanta cada vez mais desafios à humanidade, também no universo

2 Introdução

das máquinas elétricas. As possibilidades tecnológicas em termos de geradores elétricos nos diferentes aproveitamentos de energia renovável são várias, revelando vantagens e desvantagens para cada caso. Neste contexto, a aposta na eficiência energética e em diferentes formas de exploração de energias renováveis é vista como uma forte arma de modo a amenizar as consequências do consumo dos combustíveis fósseis, e gerar diferentes soluções para um futuro energético sustentável.

As máquinas elétricas são responsáveis por uma elevada percentagem da produção e consumo de energia elétrica, existindo necessidade de aperfeiçoamento das máquinas já existentes e a investigação de novas tecnologias e topologias que permitam gerar um elevado rendimento ao menor custo possível. É neste quadro que surgem as máquinas elétricas de ímanes permanentes e, em especial, as máquinas síncronas de ímanes permanentes pelo potencial que apresentam quando comparadas com as máquinas síncronas convencionais e assíncronas, especialmente quando se assiste ao abaixamento do seu preço.

As máquinas síncronas de ímanes permanentes têm e terão, cada vez mais, um importante papel em vários domínios, incluindo a sua aplicação como geradores, especialmente em aproveitamentos de energias renováveis. O recente melhoramento de características dos materiais magnéticos permanentes, com as ligas de terras raras, tem levado ao surgimento de máquinas elétricas com potências consideráveis, tornando as máquinas síncronas de ímanes permanentes competitivas em muitos campos com as máquinas síncronas convencionais, dando-lhes uma oportunidade de contribuir para uma mudança tecnológica muito importante no âmbito da produção de energia elétrica, com benefícios expressivos, nomeadamente ao nível do rendimento da transformação energética.

O uso destas máquinas em aplicações exigentes e com características melhoradas deve-se também à utilização de sistemas de controlo baseados em eletrónica de potência com custos reduzidos.

As máquinas síncronas de ímanes permanentes revelam enorme flexibilidade a nível de desenho, e são consideradas máquinas síncronas especiais porque não possuem corrente de excitação. Ao nível construtivo, a inexistência de anéis e escovas é uma mais-valia, uma vez que permite aumentar a fiabilidade e o rendimento e diminuir os custos de manutenção destas máquinas, comparativamente às máquinas equivalentes que possuam esses elementos na sua constituição.

Estas e outras características permitem que estas máquinas possam ser adaptadas às necessidades específicas de cada aplicação, adaptando-se a aplicações de baixas ou altas velocidades.

Quando comparada com uma máquina de indução, é possível afirmar que a simplicidade estrutural desta última implica um investimento inicial mais reduzido. Contudo, a máquina síncrona de ímanes permanentes, além de possuir um regime de funcionamento síncrono, apresenta características como o rendimento e fator de potência que tornam a sua exploração mais económica a médio e longo prazo, permitindo a recuperação do sobrecusto no investimento inicial. Mas, mesmo este tem vindo a diminuir nos últimos anos devido à utilização de materiais magnéticos permanentes com preço mais baixo, com elevado teor energético.

Os geradores síncronos de ímanes permanentes apresentam cada vez mais uma maior aplicação em sistemas de conversão de energia elétrica devido a vantagens que apresentam face a tecnologias tradicionais. Como geradores, são usados principalmente na conversão eólica e, recentemente, também em mini-hídricas, sem esquecer a crescente utilização em

centrais de cogeração e aproveitamento de energia das ondas. Em todos os casos, como máquinas que podem ser construídas com maior ou menor número de polos, que têm uma manutenção reduzida e, geralmente, oferecem maior confiabilidade, são uma alternativa que pode e deve ser considerada em face dos geradores síncronos convencionais e dos geradores de indução simples ou duplamente alimentados, podendo, em relação aos últimos, ter a vantagem adicional de, potencialmente, poder dispensar sempre a tradicional caixa multiplicadora de velocidades em aplicações de baixa velocidade.

Na realização deste trabalho, foi estudada e explorada experimentalmente uma máquina síncrona de ímanes permanentes disponível nos laboratórios de máquinas elétricas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, operando-a como gerador, com o objetivo de se determinarem as suas diferentes características de funcionamento e de melhor se avaliarem as suas possíveis aplicações.

1.2 - Objetivos e metodologia

O trabalho desenvolvido incluiu a recolha e estudo de diversa informação bibliográfica pertinente com vista ao aprofundamento do conhecimento sobre aproveitamentos elétricos de energias renováveis e dos aspetos fundamentais de constituição, funcionamento e teste de máquinas elétricas síncronas de ímanes permanentes, e culminou com a realização de um processo de investigação experimental, procurando alcançar os objetivos inicialmente delineados para este trabalho, a saber:

- Realização de um ponto de situação sobre as soluções tecnológicas adotadas em aproveitamentos de energias renováveis para a produção de energia elétrica, com destaque para os que se baseia em sistemas de conversão eletromecânica e aprofundamento especial para as que se baseiam em geradores síncronos de ímanes permanentes;
- Determinação experimental e análise das características de funcionamento em regime estacionário de uma máquina síncrona de ímanes permanentes de neodímio-ferro-boro, com vista à avaliação das aptidões e características especiais deste tipo de máquinas tendo em vista sua integração em aproveitamentos elétricos de energias renováveis.

1.3 - Estrutura

Esta dissertação é composta por 6 capítulos, estruturados da seguinte forma:

- Capítulo 1: O presente capítulo, onde se faz um breve enquadramento ao tema da dissertação e se apresentam os principais objetivos da mesma;
- Capítulo 2: Este capítulo é dedicado à caracterização das diferentes formas de energias renováveis, caracterização do cenário energético a nível mundial e para o caso Português, e políticas energéticas adotadas;
- Capítulo 3: Este capítulo estuda e descreve as soluções tecnológicas empregues nos aproveitamentos elétricos de energias renováveis. São analisadas as diferentes formas de produção de energia elétrica através de conversão eletromecânica e são feitas breves referências à utilização da energia fotovoltaica e às pilhas de combustível.
Inicialmente é realizada uma abordagem teórica geral ao método de cada tipo de aproveitamento, por solução e tecnologia, e na segunda parte é analisada a utilização dos diferentes tipos de geradores nos diferentes sistemas de conversão, com especial foco para o gerador síncrono de ímanes permanentes;
- Capítulo 4: Esta parte da dissertação é dedicada ao estudo exclusivo da máquina síncrona de ímanes permanentes, os seus fundamentos, aspetos construtivos, constituintes e variantes, características, modelização e aspetos particulares que valorizam o gerador síncrono de ímanes permanentes;
- Capítulo 5: O Capítulo 5 é dedicado à descrição, apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados sobre uma máquina síncrona de ímanes permanentes a funcionar como gerador elétrico, a operar em modo isolado com diferentes tipos de carga e em paralelo com a rede;
- Capítulo 6: O sexto e último capítulo resume a dissertação e apresenta as suas conclusões essenciais e perspetivas futuras de continuidade do trabalho.

Capítulo 2

Energias Renováveis

2.1 - Introdução

Situamo-nos em tempos de mudança nos quais se pretende fazer face, de forma rápida e eficaz, mas nem sempre clara e consciente, aos fatores responsáveis pelos impactes ambientais nefastos que somos alvo e cujas previsões futuras só apresentam tendência de agravamento. A utilização em larga escala de combustíveis fósseis tem alterado substancialmente a composição da atmosfera terrestre. Os efeitos causados serão catastróficos e algumas possíveis alternativas como o uso de Energia Nuclear, que eram apontados como uma possível solução eficaz, já deram a prova de que só podem agravar a situação pois produzem uma elevada quantidade de resíduos perigosos.

É extremamente importante encontrar um substituto aos combustíveis fósseis, estando o palco cada vez mais aberto para as Energias Renováveis. Estas, para além de inesgotáveis, pois usam recursos sem fim, regenerando-se, são soluções limpas e amigas do ambiente, fazendo com que a substituição do consumo de combustíveis fósseis emerja por um caminho viável, seguro e com vantagens.

No século passado, a temperatura registou um acréscimo de 0,76°C. A previsão é que no presente suba entre 1,1 e 6,4°C, dependendo das medidas mitigadoras que sejam adotadas. [1]

As principais causas para a ocorrência de alterações climáticas prendem-se com o surgimento do efeito estufa. Como forma de compensação, procura-se cada vez mais combater a desertificação, plantando mais árvores e dando lugar a novos espaços verdes de modo a tentar diminuir a quantidade de dióxido de carbono presente na atmosfera, bem como se intensifica o recurso a energias renováveis.

O crescimento da utilização das diferentes energias renováveis surge da necessidade incessante de redução da quantidade de CO₂ na atmosfera provocada pelo consumo dos combustíveis fósseis. Assim, devido à crescente escassez destes e à consciencialização para a mudança, é necessário procurar novas formas de produção por um meio seguro, vantajoso e limpo, sendo as energias renováveis um caminho possível.

2.2 - Cenários Energéticos - O paradigma do passado

O cenário energético passado caracterizou-se essencialmente pelo uso de combustíveis fósseis, com uma taxa de renovação muito mais longa do que a que são utilizados. O seu uso normalmente é desastroso em termos de emissões e provoca consequências nefastas a curto e a longo prazo no planeta.

Existem três grandes tipos de combustíveis fósseis, o carvão, o petróleo e o gás natural, sendo estes o resultado de um processo de decomposição de plantas e de animais.

O petróleo é constituído por hidrocarbonetos e a sua refinação consiste na separação em diversos derivados, permitindo obter os mais variados tipos de matérias-primas e combustíveis. A influência na economia global é enorme, estando muitas vezes diretamente ligada a conflitos entre nações. Um dos objetivos das refinarias é obter a maior quantidade possível de gasolina, sendo esta a fração de petróleo mais utilizada. Está previsto que com o atual crescente ritmo de consumo, as reservas de petróleo existentes no nosso planeta se esgotem num período de 30 a 40 anos.

O carvão é uma das fontes energéticas bastante abundantes e barata, contudo, não substitui o petróleo. Inicialmente este era usado nos processos industriais, tendo este uso sido abandonado gradualmente à medida que a utilização do petróleo e seus derivados surge. Está previsto que com o atual ritmo de consumo, as reservas de carvão disponíveis durem até 120 anos.

O enorme problema da utilização do carvão é a sua queima, uma vez que conduz à formação de cinzas, dióxido de carbono, dióxido de enxofre e óxidos de azoto em maiores quantidades do que os produzidos na combustão dos restantes combustíveis fósseis.

O gás natural caracteriza-se por ser o mais simples dos combustíveis fósseis, uma vez que é constituído por uma substância bem definida, o gás metano. A combustão deste gás constituído apenas com carbono e hidrogénio representa uma queima mais limpa do que qualquer derivado do petróleo.

Em termos de risco de poluição, o gás é o combustível mais limpo, no entanto todos apresentam problemas com a poluição atmosférica, acidificação do ambiente e aquecimento global.

O consumo mundial de energia primária tem vindo a aumentar de década para década, assim como o consumo de eletricidade, estando estes ligados. A figura 2.1 representa a evolução do consumo mundial de eletricidade em função da tecnologia energética:

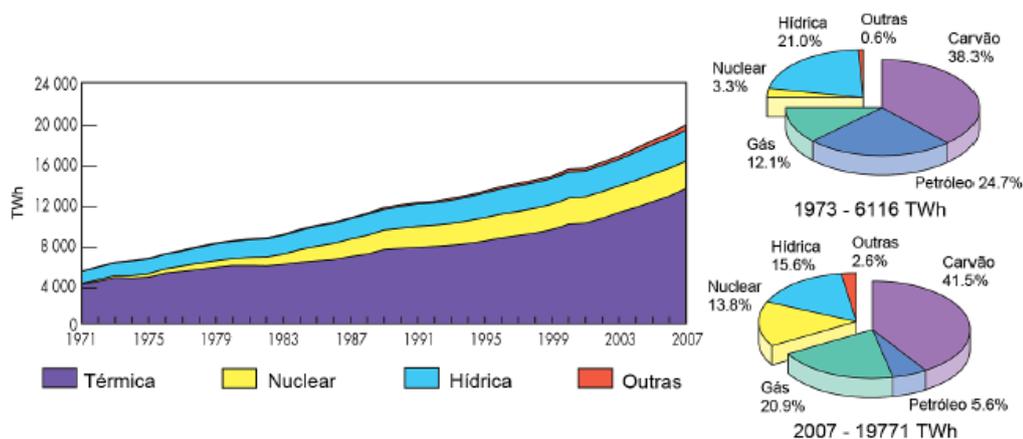


Figura 2.1: Consumo mundial de eletricidade em função da tecnologia energética. [2]

A produção de eletricidade utilizando combustíveis fósseis é ainda dominante nos dias que correm, embora se verifique uma diminuição cada vez maior devido à substituição destes por outro tipo de energias. Inicialmente, optou-se pelo uso da energia nuclear, sendo este tipo de energia ineficaz pois apresenta demasiados riscos. O petróleo vem cada vez mais a ser substituído pelo carvão e pelo gás natural. A implementação de outro tipo de fontes de produção de eletricidade, como a eólica e a solar, foram realizadas em maior escala nos últimos vinte anos. A utilização em larga escala durante décadas de combustíveis fósseis conduziu a um aumento da quantidade de dióxido de carbono emitido. A maior industrialização dos países em vias de desenvolvimento agravou a situação, emitindo quantidades maiores, tornando-se assim de importância relevante reduzir as emissões. Os dados abaixo representados mostram, que não se verificam sinais de mudança relativamente às emissões de dióxido de carbono e que o consumo de energia está ligado a o desenvolvimento mundial. Em jogo estão várias economias dependentes de combustíveis fósseis.

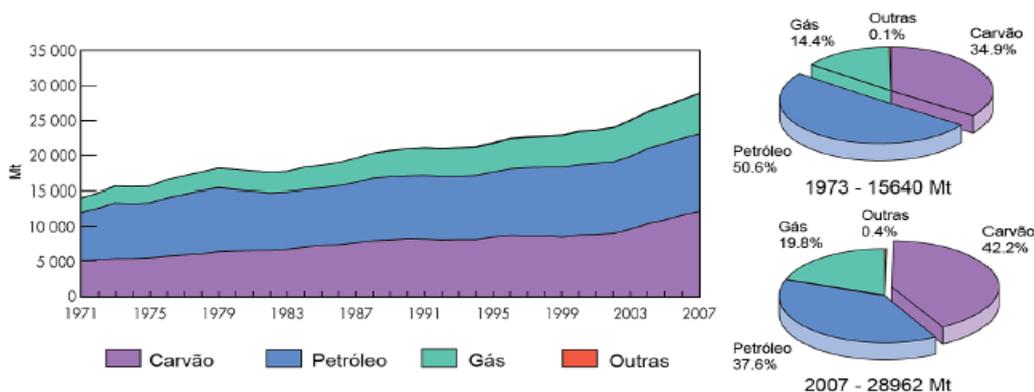


Figura 2.2: Emissões mundiais de dióxido de carbono em função do tipo de combustível. [2]

A economia portuguesa apresentava, em 2004, um consumo final de energia maioritariamente oriundo do petróleo (58%), sendo o país europeu com maior dependência desta fonte (média da UE é de 40%). O consumo final de eletricidade representava 19% do consumo de combustíveis fósseis, e o de energias renováveis, 9%. A produção doméstica de energia assenta na Eletricidade e em algumas Energias Renováveis. [3]

2.3 - Energias Renováveis

Portugal apresenta inúmeras condições favoráveis para o aproveitamento de praticamente todas as formas de produção de energia renovável, pelo que isto deve ser encarado como uma oportunidade, não limitada apenas ao contexto ambiental, mas também ao nível social e económico face à crise que o país atravessa, pois a descentralização desses aproveitamentos funciona como um incentivo para a criação de postos de trabalho em áreas menos desenvolvidas. Uma aposta neste ramo é uma mais-valia para o país, uma vez que este é pobre em recursos naturais que permitam a produção de combustíveis para a produção de energia pela forma convencional. Portugal não possui poços de petróleo, minas de carvão significativas ou depósitos de gás conhecidos, no entanto, é bastante rico em recursos naturais como o sol, vento e água. A rede hidrográfica é densa, a exposição solar média anual é alta e é vasta a frente marítima que lhe oferece ventos constantes. Estas características permitem que Portugal se coloque na vanguarda da demanda de um desenvolvimento sustentável.

A investigação e desenvolvimento nesta área devem ser uma prioridade uma vez que é possível efetuar uma representação do desenvolvimento de uma abordagem integrada entre o mundo académico e empresarial, com o intuito de usar o conhecimento na vertente comercial, tendo como alvo e especificidade Portugal e as suas características naturais, que permitem o aproveitamento destes recursos. Irão ser apresentadas características específicas de cada energia renovável abaixo.

2.3.1 - Energia Geotérmica

A energia geotérmica caracteriza-se pelo aproveitamento do calor proveniente da Terra. As elevadas temperaturas presentes no interior do nosso planeta têm como fundamento diversos fatores, tais como: decaimento radioativo de alguns elementos presentes em rochas, pressão, profundidade, tectónica de placas, vulcanismo e a própria geologia dos diferentes locais. O aquecimento das águas subterrâneas por parte destes fatores torna possível o aproveitamento do calor sobre a forma de energia. A produção de eletricidade faz-se através do acionamento de uma turbina, sendo esta movida a vapor de água resultante do aquecimento proveniente do interior da terra.

2.3.1.1 - Contexto Internacional

A primeira tentativa de geração de eletricidade através deste tipo de energia foi tentada nos inícios do século XX na Itália. Com o avanço da tecnologia, procedeu-se à exploração deste tipo de energia alternativa e países com imensa atividade vulcânica são automaticamente convidados a fazerem uso do calor interno proveniente do planeta. O aproveitamento de geisers é bastante frequente na região da Califórnia. Países como México, Japão, Filipinas, Quênia e Islândia têm expandido a produção de eletricidade por meio geotérmico. Atualmente, os Estados Unidos da América são o maior país do mundo a fazer aproveitamento deste tipo de energia. [4]

2.3.1.2 - Em Portugal

Os aproveitamentos mais interessantes na área da geotermia em Portugal são os realizados nas ilhas dos Açores. Em Portugal continental, existem essencialmente aproveitamentos de baixa temperatura, ou termais. Um exemplo é o caso do projeto geotérmico do Hospital da Força Aérea do Lumiar, em Lisboa, obtida a partir de um furo com 1500 metros de profundidade, com temperaturas superiores a 50 °C, a funcionar desde 1992. [5]

Os Açores dispõem de apreciáveis fontes de energia renovável, como a eólica, hídrica e geotérmica, apesar de serem atualmente uma região maioritariamente dependente dos derivados do petróleo. A energia geotérmica, entre as renováveis, é aquela que apresenta um maior potencial em consequência do processo de formação do arquipélago e da sua localização junto da Crista Médio Atlântica, na confluência de três placas tectónicas - Americana, Africana e Eurasiática.

A região apresenta-se com um enquadramento geoestrutural que proporciona uma intensa atividade vulcânica, bem como de outras manifestações superficiais indicadoras da enorme quantidade de energia endógena existente no subsolo em muitos locais do arquipélago.

A produção de energia a partir de recursos geotérmicos é competitiva relativamente às alternativas a partir dos combustíveis fósseis, vantagem que tem vindo a aumentar face ao aumento do preço dos derivados do petróleo. Um aproveitamento geotérmico exige elevado esforço de investimento inicial, muito superior à alternativa térmica tradicional, pois, além da construção da central, é necessário executar um parque de poços de produção e de injeção.

Todavia, importa realçar que os custos diretos de produção são baixíssimos e que a exposição a fatores externos é reduzida, o que proporciona um custo de produção dominado durante a vida útil do projeto. O impacto ambiental de um aproveitamento geotérmico é mínimo e com uma área afetada muito reduzida, quando comparado com as alternativas tradicionais a partir da queima dos derivados de petróleo. Ao nível da operação, não são produzidas pelo processo de transformação de energia quaisquer emissões de CO₂ resultantes de combustão, e todo o geofluido, após as trocas de calor, é encaminhado para o reservatório através de poços de injeção criteriosamente localizados em relação aos poços de produção.

Nos Açores existem duas importantes centrais Geotérmicas cuja sua evolução de potência instalada é representada na figura 2.3:

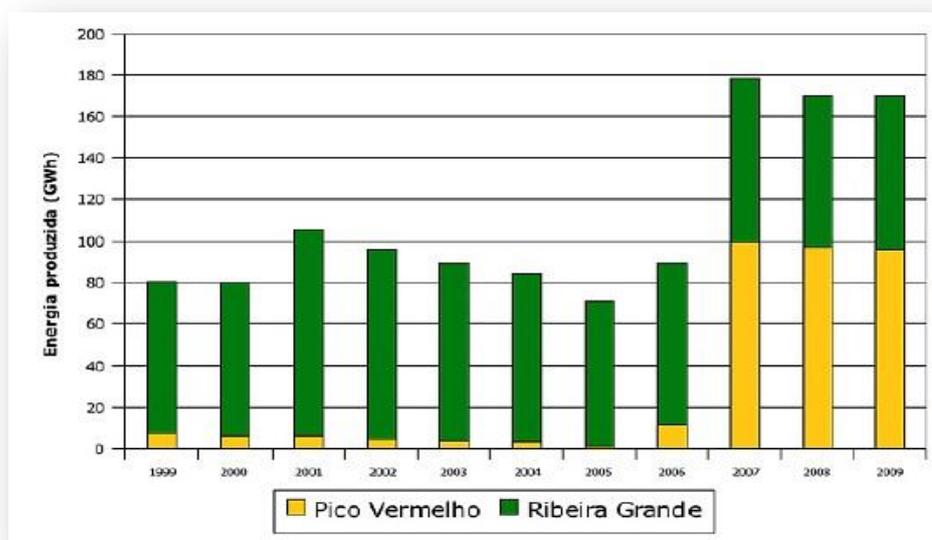


Figura 2.3: Evolução da exploração da Central Geradora Ribeira Grande e Central Geradora Pico Vermelho. [6]

Das centrais, a que maior produção apresenta é a Central Geradora Pico Vermelho, em consequência da maior abundância de produção de geofluido dos atuais cinco poços de produção que a alimentam. A produção combinada das duas centrais ascendeu em 2009 a 170 GWh, o que contribui na estrutura de produção da Ilha de S. Miguel com uma quota de 37%, o que, adicionado à hídrica, eleva a penetração das energias renováveis para 41%. [6]

Os dados citados pelo Serviço Regional de Estatística indicam que a produção de eletricidade no arquipélago, nas centrais geotérmicas, hídricas e eólicas, cresceu de 114.129 para 131.390 MWh entre Janeiro e Junho de 2011, um aumento quase integralmente assegurado pela geotermia, que subiu, nesse mesmo período, de 77.331 para 95.223 MWh, já pesando 1/3 da produção de eletricidade nesta região. [7]

O Governo dos Açores pretende que o aproveitamento de recursos renováveis permita garantir 75% da produção de eletricidade no arquipélago, dentro de sete anos. Nesse sentido, a EDA (Eletricidade dos Açores) tem em execução um plano que prevê que as fontes renováveis representem cerca de 50% da produção de energia em 2014. Nos próximos quatro anos, a elétrica regional tem previsto investimentos nesta área que ascendem a cerca de 100 milhões de euros. [8]

Em resumo e quanto ao futuro:

- A Energia Geotérmica constitui um recurso gradualmente mais importante estando vulnerável à possibilidade de maiores investimentos;
- É possível a criação de centrais para a realização de um aproveitamento a baixa temperatura na cidade do Funchal, Ilha da Madeira;
- A energia geotérmica tem um potencial bastante interessante a nível nacional, apesar dos aproveitamentos de entalpia elevada se situarem nos

Açores, sendo necessário, no futuro, uma série de ações de informação, regulamentação e apoio desta fonte renovável de energia.

- Este tipo de energia é restrita, não sendo esta possível de ser aproveitada em todos os lugares do planeta o que oferece a dificuldade de implantação de projetos em determinadas localidades. Normalmente, os fluxos geotérmicos englobam na sua constituição gases compostos por sulfato, de natureza corrosiva, representando uma ameaça para a contaminação de águas junto de uma central.

2.3.2 - Energia Biomassa

A Biomassa é definida por toda a matéria orgânica, não fóssil, com origem biológica que pode ser explorada com o intuito de se produzir energia. Esta pode ser produzida através de plantas, animais e resíduos provenientes da agricultura, ou seja, do material biológico proveniente dos seres vivos que pode ser convertido em energia.

Existem três tipos de Biomassa, a Biomassa Sólida, a Biomassa Líquida e a Biomassa Gasosa. A primeira tem como fonte os produtos e resíduos da agricultura, estando neles incluídos substâncias vegetais e animais, assim como resíduos florestais e a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos. Esta tem como processo a recolha dos vários resíduos de que é composta, seguido do transporte para os locais de consumo, onde se faz o aproveitamento energético por combustão direta.

Um exemplo de Biomassa Líquida podem ser os biocombustíveis líquidos, como o biodiesel, sendo este obtido a partir de óleos de colza ou girassol, o etanol, produzido devido à fermentação de hidratos de carbono, ou o metanol, sendo este gerado pela síntese do gás natural.

A Biomassa Gasosa pode ser encontrada nos resíduos sólidos urbanos e nos efluentes agropecuários provenientes da agroindústria. Estes resíduos resultam da degradação biológica da matéria orgânica e são constituídos por uma mistura de metano e gás carbónico.

Como vantagens a Biomassa, sendo uma energia renovável, apresenta-se muito pouco poluente pois não emite dióxido de enxofre, sendo uma solução extremamente barata e fiável. As cinzas provenientes da combustão são menos agressivas para o meio ambiente do que as cinzas emitidas pela queima de combustíveis fósseis. Esta apresenta assim um menor risco ambiental, sendo um fonte de energia renovável limpa e segura, possível de melhorar a qualidade do ambiente. Para aumentar o uso da biomassa é necessário proceder-se à criação de culturas agrícolas apenas com fins energéticos, efetuar um melhoramento nos sistemas sanitários de modo a diminuir o desperdício de matéria, por exemplo, sob a forma de gás

Em complemento, esta apresenta outras desvantagens como a desflorestação de florestas e a formação de chuvas ácidas como consequência do uso de biocombustíveis.

2.3.2.1 - Contexto Internacional

Os recursos renováveis representam atualmente cerca de 20% do fornecimento total de energia no mundo, com cerca de 14% proveniente de biomassa. A produção de energia primária a partir de biomassa sólida caiu 2,9 por cento na Europa, entre 2010 e 2011, para

78,8 Mtep. Já a produção de eletricidade a partir de biomassa sólida no espaço europeu foi de 72,8 TWh, uma queda de 2,4 Mtep. Os números são avançados pelos Eurobarómetro que mostra também que Portugal tem vindo a contrariar esta tendência europeia, com uma evolução de 2,582 Mtep, em 2010, para 2,617 Mtep de produção de energia primária, em 2011. Quando olhamos para a produção de eletricidade, as centrais elétricas utilizaram 0,665 TWh, as cogerações 1,560 TWh, um total de 2,225 TWh. Em 2011, as centrais elétricas produziram 0,745 TWh e a cogeração 1,722 TWh, perfazendo um total de 2,467 TWh. [9]

2.3.2.2 - Em Portugal

A floresta cobre cerca de 38% do território Português, estando distribuída essencialmente por Pinhal e Resinosas (1136,3 Ha), Montados (1196,4 Ha), Soutos e Carvalhais (174,9 Ha) e Eucaliptos (695,1 Ha).

No entanto, estes números não revelam o panorama atual do aproveitamento do potencial da biomassa florestal, que se traduz pelo quase "abandono" da floresta, sendo difícil quantificar o verdadeiro potencial energético deste recurso.

Outros entraves, como a falta de equipamentos para sistemas de recolha apropriados, falta de uma estrutura do setor, falta de tratamento fiscal adequado, receio dos proprietários e industriais da indústria da madeira, ou a grande agressividade de setores concorrentes como o do gás, têm originado uma estagnação do aproveitamento deste potencial.

Atualmente o potencial quantificável passa sobretudo pela biomassa florestal, não havendo números para o setor agrícola, onde os resíduos da vinha, indústria do vinho, podas de olivais e árvores de frutos, do bagaço da azeitona, etc., poderão ter um interesse exploratório considerável.

O quadro seguinte (2.1), sintetiza as quantidades indicativas de biomassa florestal de acordo com a proveniência:

Tabela 2.1: Produção de Biomassa Florestal em Portugal [10]

Tipo de Resíduo	Quantidade [milhões de ton/ano]
Matos (incultos)	4
Matos (sob-coberto)	1
Produção de Lenhas	0,5
Ramos e Bicadas	1
Total	6,5

2.3.3 - Energia Hidrogénio

A energia formada através do Hidrogénio é uma energia obtida através da combinação do Hidrogénio com o Oxigénio, produzindo vapor de água e libertando energia que posteriormente será convertida em eletricidade. Atualmente, existem veículos a utilizarem este tipo de energia, contribuindo para a redução do consumo dos combustíveis fósseis. O Hidrogénio é o elemento químico mais abundante no Universo, o mais leve e o que possui

maior valor energético. Considerado o combustível renovável do futuro, uma vez que a sua utilização no âmbito das energias renováveis ainda é relativamente limitada, embora já seja utilizada para geração de energia elétrica em indústrias, residências, centros comerciais, automóveis e equipamentos eletrónicos. Esta forma de produção de energia é menos poluente que os tradicionais combustíveis, dado que a eletricidade é produzida através de pilhas de combustível, ficando o vapor de água como produto da reação. No quadro legal dos incentivos e benefícios fiscais das energias renováveis em Portugal, o hidrogénio é um parente pobre, possuindo poucos apoios.

Como vantagens, esta forma de energia apresenta uma nula toxicidade, a reduzida emissão de gases que provocam o efeito estufa, redução da poluição sonora uma vez que as células de hidrogénio trabalham silenciosamente, uma grande utilidade a nível dos transportes e um possível desenvolvimento económico crescente juntamente com a criação de postos de trabalho. Por sua vez, a sua maior desvantagem é a sua tecnologia ser bastante dispendiosa, juntamente com a inexistência de uma boa relação entre eficiência e preço, assim como problemas e custos associados ao transporte e distribuição. Esta seria a melhor fonte energética do mundo caso não ocorressem dois problemas ligados às suas técnicas de produção e fabrico.

O Hidrogénio pode ser obtido através da eletrólise da água. Esta, sob a ação de corrente contínua, quebra-se formando hidrogénio e oxigénio. Este método revela-se bastante dispendioso pois gasta muita eletricidade e, para além disso, é difícil guardar o gás hidrogénio para usá-lo, devido à pressão do ambiente a que está sujeito. É necessário comprimi-lo e colocá-lo em cilindros de forma a armazená-lo.

Outro método consiste na decomposição da água, na presença de ácido clorídrico. O método revela-se económico e barato, no entanto os resíduos contendo ácido são poluentes, portanto, a vantagem do hidrogénio produzido não ser poluente é diminuída.

Esta forma de produção de energia apresenta-se no presente com custos elevadíssimos e muito pouco dominada em grandes escalas, estando ainda em evolução. A nível internacional, a Itália possui a primeira central a hidrogénio no mundo. [11]

2.3.4 - Energia Maremotriz

O aproveitamento da Energia Maremotriz, energia proveniente do mar (ondas, marés, etc...), resulta da conversão de energia criada pelo movimento da água, transformando energia cinética em energia elétrica, por meio de geradores.

A energia das ondas provém do aproveitamento das ondas do oceano, tendo já sendo vinda a ser desenvolvida desde a década de setenta.

Atualmente existe uma enorme variedade de formas que permite que a energia seja produzida, podendo ser encontrados imensos sistemas em fase de desenvolvimento.

As ondas do mar apresentam energia cinética devido ao movimento da água e energia potencial devido à sua altura.

A energia das marés constitui uma solução a longo prazo como fonte de produção de eletricidade pois as suas tecnologias de conversão estão ainda atrasadas quando comparadas com outras formas de produção, como a eólica ou até a energia das ondas. Uma possível explicação para a ocorrência deste facto tem a ver com a existência de barreiras técnicas e o surgimento de conflitos administrativos, legais e financeiros. As barreiras técnicas estão relacionadas com as características do próprio recurso, fortemente dependentes de fatores

naturais. Esta energia renovável está exposta a uma forte irregularidade e intermitência de produção. As barreiras relacionadas com os conflitos administrativos têm em conta as zonas de atuação desta atividade uma vez que a sua implementação pode interferir com zonas restritas à pesca, extração de materiais, recreio e lazer, ou até mesmo na interseção de rotas marítimas.

2.3.4.1 - Contexto Internacional

Esta forma de geração de energia a partir das marés é utilizada principalmente no Japão, na Inglaterra e no Hawai, havendo centrais em fase de construção no Canadá, México, Estados Unidos da América e Argentina. De modo a se verificar a viabilidade de um aproveitamento deste género, é necessário implantar este tipo de turbinas em locais com boas condições geográficas e onde se verifique uma grande amplitude de marés, num mínimo de 5 metros.

A energia das ondas tem desafiado admiradores da ciência desde há já muitos anos e em diversos locais. A investigação profunda neste caso foi levada a cabo devido à crise petrolífera, onde diferentes países com condições para obterem energia através deste recurso, começaram a ter em conta este tipo de energia como solução. Desde aí e até então que o desenvolvimento da energia das ondas permanece nos países que se moveram nessa altura, tendo surgido programas de investigação com diversos apoios, principalmente na Irlanda, Dinamarca, Noruega, Portugal, Suécia e Reino Unido.

2.3.4.2 - Em Portugal

O método de funcionamento da energia das marés consiste na construção de centrais hidroelétricas próximas do mar, encarregando-se os diques pela captação de água quando a maré está alta. De seguida a água é libertada quando a maré baixar, passando por uma turbina que irá gerar energia elétrica. Este tipo de aproveitamento pode ser também utilizado longe da costa.

Esta tecnologia apresenta um custo de instalação elevado, para além de que a construção da albufeira poderá trazer mais impactes ambientais nefastos, afetando ecossistemas. Só poderão funcionar durante 10 horas por dia.

Relativamente à energia das ondas, Portugal tem clara experiência nesta área, sobretudo em termos de I&D e de mercado. Falta-lhe, contudo, a componente tecnológica, quer em relação à tecnologia a utilizar para aproveitar a energia das ondas, quer em relação às chamadas tecnologias de apoio (cabos elétricos, operações de instalação, operação e manutenção, etc.). Contudo, pode dizer-se que Portugal está na linha da frente com mais uns 8 países, embora numa posição mais frágil em termos tecnológicos. Temos alguma capacidade para recuperar uma posição de maior vanguarda que já tivemos, embora a presente conjuntura não seja muito favorável. Para isso temos que tirar mais partido dos projetos em curso no País (Waveroller, central do Pico, WaveBob), dinamizar rapidamente a zona piloto de São Pedro de Moel, criar expectativas de mercado através da caracterização de outras zonas com potencial para serem áreas concessionadas e de processos de licenciamento atrativos, dotar o País dum centro de competências com prestígio internacional nesta área

(sendo o Centro de Energia das Ondas o melhor candidato), conhecer a cadeia de fornecimento (identificando as atividades de maior valor acrescentado e as capacidades nacionais a nível de indústria e serviços) e assegurar que esta forma de energia tem um impacto benigno, quer sobre a sociedade, quer sobre o ambiente. [12]

2.3.5 - Energia Hídrica

A energia Hídrica consiste na energia obtida a partir da energia potencial proveniente de uma massa de água, podendo ser aproveitada através dos desníveis ou quedas-de-água existentes. A presença de turbinas permite que esta energia passe sobre a forma de energia potencial para energia mecânica, que com a ajuda de um alternador se transforma em engenharia elétrica. Normalmente, são construídas barragens servindo de reservatórios que acumulam e param os cursos de água, fazendo com que passem por uma turbina de forma contínua para a produção de energia.

2.3.5.1 - Contexto Internacional

As centrais hidroelétricas fornecem atualmente cerca de 650.000 MW de potência elétrica em todo o mundo. Para o aproveitamento desta forma de energia é necessário existir regiões montanhosas, rios ou precipitações pesadas.

Os maiores utilizadores deste tipo de energia são os Estados Unidos, Canadá, Rússia e Brasil. A China possui a maior barragem alguma vez já construída com uma capacidade de 22500 MW, a central hidroelétrica das três gargantas. A Noruega e o Egito também possuem elevada capacidade instalada.

Os maiores consumidores mundiais situam-se na Ásia do Pacífico, seguidos pela África. Os dados são referentes a 2012 segundo a BP (British Petroleum) e estão representados na figura 2.4.

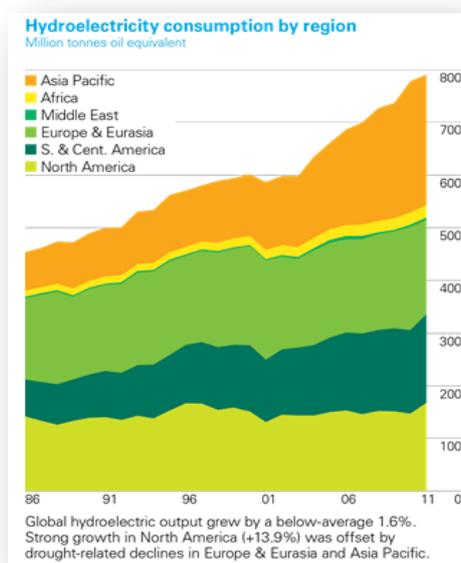
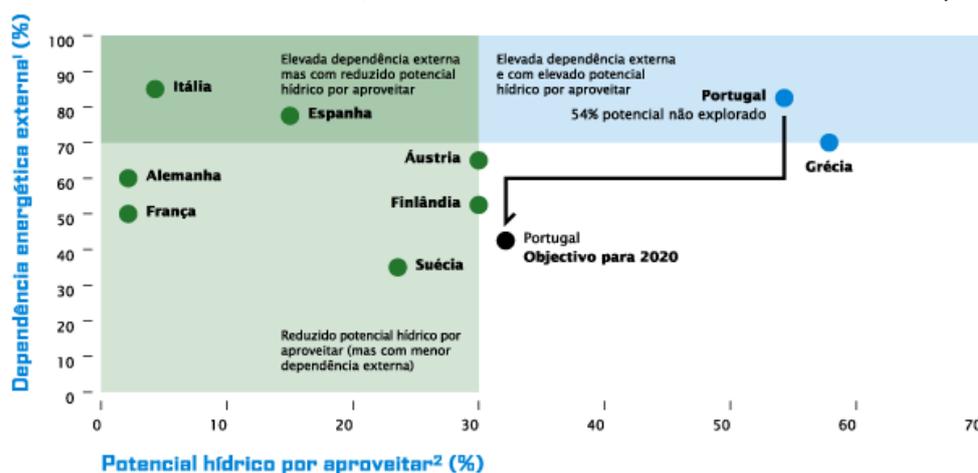


Figura 2.4: Consumo mundial energia Hidroelétrica (toneladas equivalentes de petróleo). [13]

2.3.5.2 - Em Portugal

Portugal é um país com um território com uma rede hidrográfica bastante rica. Este possui cadeias montanhosas que permitem o fluxo de grandes correntes de água como riachos, rios, fontes naturais, etc...

Na energia hídrica existem duas realidades a distinguir: existem centrais hidroelétricas fio-de-água e albufeira, sendo que as primeiras produzem constantemente eletricidade e as segundas atuam como reservatório, de modo a cobrir as necessidades em horas de pico.



1. Importação de energia primária / procura nacional total; 2. Capacidade instalada hídrica total / potencial hídrico teórico
Fonte: DIGGE; REN; Base de Dados UIDI

Figura 2.5: Potencial hídrico por aproveitar e dependência energética externa nacional. [14]

Atualmente, cerca de 30% da energia consumida em Portugal tem origem hídrica. Abaixo podemos verificar o potencial hídrico Português por aproveitar e a dependência energética externa nacional.

O potencial hidroelétrico está distribuído por todo o país mas com especial incidência no norte e centro. De todas as energias renováveis, a hídrica é a que mais produz no nosso país, deixando outras energias renováveis muito atrás. Apesar de tudo, Portugal aproveita apenas 46% do seu potencial hídrico. O governo Português quer apostar em grande no reforço do aproveitamento, estando previsto chegar a 2020 com um aproveitamento próximo dos 70% do potencial hídrico nacional.

Esta forma de energia apresenta vantagens e desvantagens, sendo estas:

Vantagens:

- Energia limpa, sem emissão de gases nem formação de chuvas ácidas;
- Forma de energia relativamente barata, com custos operacionais baixos sem constantes melhorias tecnológicas;
- Possibilidade de controlo de fluxo de água e armazenamento.

Desvantagens:

- A construção da barragem requer um enorme investimento e, para além disso, os locais de construção são limitados;
- As barragens afetam o leito dos rios provocando erosão e podem afetar ecossistemas e espécies, como o caso do salmão;
- A construção destas situa-se longe dos pontos de consumo, pelo que o transporte através das redes acrescentará custos na energia.

2.3.6 - Energia Solar

A energia solar é uma forma de energia que pode ser explorada de duas maneiras, a forma passiva e a forma ativa.

A forma passiva consiste no aproveitamento solar através da arquitetura dos edifícios, para o aquecimento da casa. Caracteriza-se assim como uma das alternativas para melhorar a eficiência energética dos edifícios. Neste caso, podemos utilizar a orientação dos edifícios e a localização de janelas e claraboias, evitando até 20% das necessidades de aquecimento.

A forma ativa consiste na utilização de painéis solares e o consequente aproveitamento da energia do sol para a produção de energia elétrica ou para o aquecimento de águas. Em painéis solares fotovoltaicos ou painéis solares térmicos, respetivamente. Os painéis solares térmicos são utilizados para o aquecimento de águas e climatização do ambiente, através de coletores solares, normalmente colocados nos topos de edifícios, que transferem a energia solar para um fluido que irá aquecer a água. Os painéis solares fotovoltaicos são utilizados para a produção de energia elétrica.

Nestes últimos, a radiação solar é convertida em energia elétrica através dos semicondutores (normalmente constituídos por silício, apresentando um rendimento de 25-30%).

As células fotovoltaicas são semicondutores que ao receberem a energia solar produzem uma tensão elétrica. O sistema solar fotovoltaico pode estar conectado à rede, ou desligado desta. Se estiver conectado denomina-se por “on-grid”, podendo este abastecer edificações completas com possibilidade de venda de energia elétrica à rede. A utilização de um sistema solar fotovoltaico pode também operar em modo “off-grid” ou isolado, não estando conectado à rede elétrica e atuando no abastecimento de locais remotos.

A figura seguinte representada ilustra os tipos de sistemas fotovoltaicos existentes e as suas utilizações.



Figura 2.6: Tipos de sistemas fotovoltaicos e utilizações. [15]

2.3.6.1 - Contexto Internacional

Apesar do admirável crescimento dos últimos anos, o mercado está ainda muito concentrado, sobretudo na Alemanha. Esta nação já aposta neste tipo de energia há bastantes anos, sendo isto uma consequência direta do atual domínio. A Itália apostou fortemente, substituindo em 2011 a Espanha, no segundo lugar no top de países com maior concentração de capacidade instalada de energia fotovoltaica no mundo. O Japão mantém-se no terceiro lugar em ambos os anos.

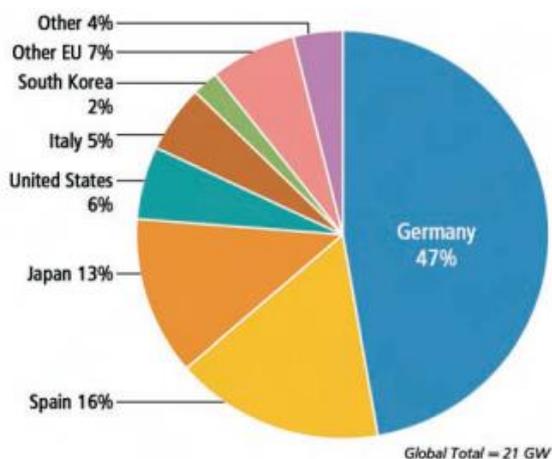


Figura 2.7: Concentração da energia fotovoltaica no mundo (2009). [16]

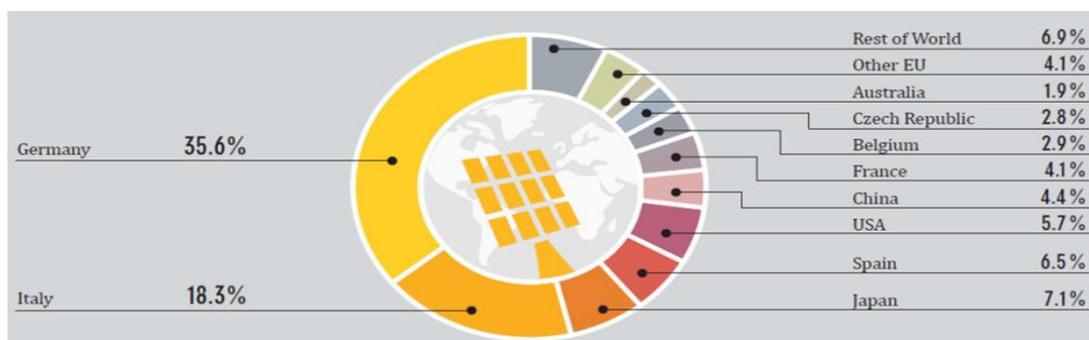


Figura 2.8: Concentração da energia fotovoltaica no mundo (2011). [16]

2.3.6.2 - Em Portugal

Portugal é decerto, em conjunto com a Espanha, a zona da Europa mais atraente para se efetuar um investimento em energia solar devido aos elevados valores de incidência de radiação solar. Com uma média superior a 2500 horas anuais de incidência solar, o Alentejo e o Algarve chegam a ultrapassar as 3000 horas.

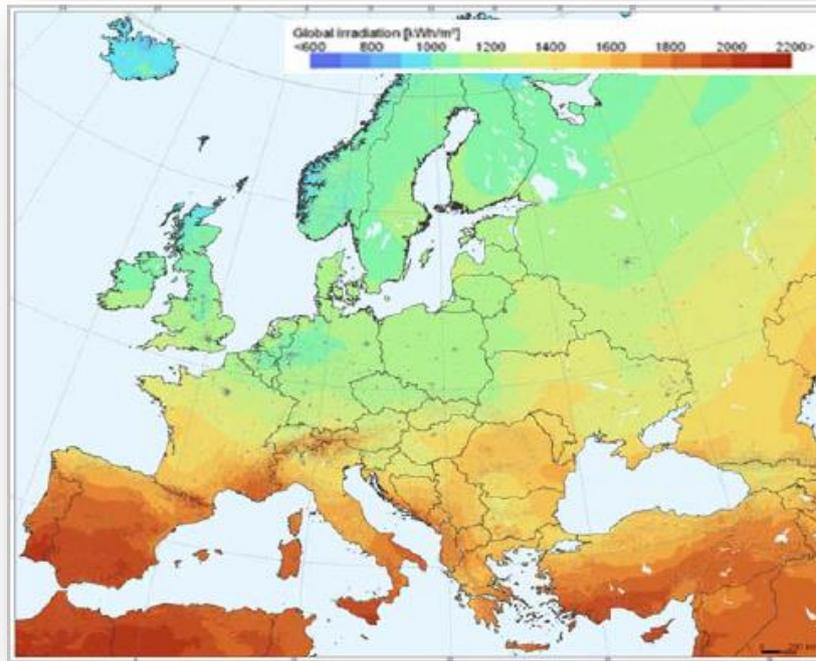


Figura 2.9: Índice de irradiação global na Europa. [17]

Atualmente, Portugal possui um dos maiores investimentos em energia solar em funcionamento, do mundo. Este parque fotovoltaico situado na zona Alentejana teve uma construção de 46 MWp de potência e a sua instalação produz cerca de 93 milhões de KWh por ano, energia suficiente para alimentar o consumo de 30 mil lares portugueses. Portugal apresenta uma fraca experiência neste mercado, assim como um atraso em relação aos “first movers”. Existe a oportunidade de investimentos internacionais nesta área no nosso país, suprimindo a necessidade do rejuvenescimento industrial em falta.

Como em qualquer mercado recente que atravessa uma fase de crescimento e estruturação, existem falhas e entraves no seu desenvolvimento. Só conseguindo ultrapassar estas barreiras (desfasamento entre produção e consumo, problemas na rede com a produção descentralizada, diminuição da eficiência de conversão com o calor excessivo, subsídios), poderemos apostar num mercado fotovoltaico ao nível dos melhores do mundo que potencie a indústria e a torne competitiva mundialmente.

2.3.7 - Energia Eólica

A energia eólica representa o aproveitamento da energia cinética do vento para produzir energia mecânica, gerada pela rotação das pás de um aerogerador, que pode ser transformada de seguida em energia elétrica por um gerador elétrico. Excluindo a microprodução e soluções de eixo vertical, um aerogerador é constituído por uma torre de 50 a 120 metros de altura, no topo da qual se situa um rotor com três pás. Como é natural, a energia produzida por qualquer aerogerador aumenta com a velocidade do vento (em caso de ventos excessivamente fortes, o aerogerador para, orientando as pás paralelamente ao vento para se proteger). Os sítios com mais vento são junto à orla marítima ou no topo das

montanhas, devido ao efeito de aceleração que o relevo tem sobre o vento. Geralmente, a velocidade do vento aumenta com a altitude, uma vez que, longe do solo, sofre menos fricção com a superfície terrestre. As turbinas mais usuais instaladas nos parques eólicos possuem uma potência de cerca de 2 a 3 Megawatts cada uma, permitindo responder às necessidades em eletricidade de cerca de 2000 a 3000 lares.

2.3.7.1 - Contexto internacional

A capacidade mundial de produção de energia a partir de energia eólica tem vindo a aumentar ao longo dos anos, e o seu custo de produção tem caído gradualmente ao longo do tempo, devido à súbita ascensão da tecnologia de produção de aerogeradores. O país com maior capacidade eólica instalada do mundo é a China, estando este lugar em constante disputa com os Estados Unidos da América.

2.3.7.2 - Portugal

Portugal tem hoje o segundo maior nível de penetração de energia eólica na Europa, logo a seguir à Dinamarca, representando este tipo de energia a produção de 15% da eletricidade consumida em 2010 no nosso país e 18% em 2012.

Depois da hídrica, a energia eólica é decerto a energia renovável mais explorada no nosso país, uma vez que todos os locais com relevante abundância de vento se encontram em exploração.

Atualmente, Portugal continental apresenta 2268 aerogeradores instalados, sendo que uma torre é usada através de eólica offshore e está situada no mar da costa da Póvoa de Varzim. No total existem 221 parques eólicos, com uma capacidade instalada de 4338 MW, onde 36% da potência está instalada em parques com potência igual ou inferior a 25 MW. Os dados pertencem à Direção Geral de Energia e Geologia.

A utilização deste tipo de energia comporta numerosas vantagens face às energias tradicionais e mesmo em comparação com outros tipos de energias renováveis, uma vez que se encontra bastante desenvolvida. Esta é inesgotável, pois provém do vento, e os parques apresentam uma excelente rentabilidade de investimento.

A criação de parques eólicos representa uma vantagem para a sociedade dado que gera investimento em zonas desfavorecidas e, conseqüentemente, benefícios financeiros migram para as zonas camarárias destes parques, assim como originam a criação de novos postos de trabalho.

Contudo, também existem desvantagens, tais como a intermitência do recurso natural. Nem sempre o vento sopra quando a eletricidade é necessária, tornando difícil a integração da sua produção no programa de exploração. O impacto visual gera uma enorme modificação na paisagem e as pás influenciam no ecossistema de aves do local, provocando morte destas pelo choque com as pás. Para além disso, o impacto sonoro é um fator a ter em conta como desvantagem, uma vez que o som do vento bate nas pás provocando um ruído constante de cerca de 43 dB, fazendo com que estas devam ficar a uma distância mínima de cerca de 200 metros da população.

2.4 - Políticas Energéticas

A energia é a base do desenvolvimento económico de qualquer país. No caso Português, a situação económica tem-se vindo a degradar ao longo dos anos de forma vertiginosa, com insignificantes crescimentos do produto interno bruto e fazendo com que a política energética nacional careça de uma revisão uma vez que os custos associados à energia implicam efeitos nas condições de vida dos cidadãos e atividade das empresas.

Todas as estratégias de saída da crise são baseadas na necessidade de se aplicar um aumento da competitividade empresarial que o custo da energia irá prejudicar.

Os parâmetros da atual política energética em Portugal são os seguintes:

- Utilização de critérios de racionalidade económica;
 - Reforço da aposta em eficiência energética com um abrandamento das opções renováveis mais dispendiosas;
 - Revisão em baixa da potência renovável a instalar em função da redução da procura;
 - Revisão do Mix renovável apostando em tecnologias mais maduras com custos mais baixos;
 - Procura de um Mix energético equilibrado entre combustíveis fósseis e as diversas fontes renováveis, reduzindo os sobrecustos da produção em regime especial;
 - Cumprir as metas estabelecidas no protocolo de Quioto;
 - Promoção da competição efetiva entre os produtores de energia em regime especial nos mercados grossistas de eletricidade;
 - Aumento da capacidade de armazenamento do sistema elétrico de energia.
- [18]

Em Portugal, as energias renováveis mais influentes no panorama energético nacional são sem dúvida a Hídrica, Eólica e Solar.

Relativamente à energia hídrica, em 2012 o governo cortou subsídios, afetando os produtores das grandes barragens, para além de que estão suspensos até 2014 todos os processos de atribuição de novas licenças hídricas. Uma central deste tipo demora 10 anos para ser licenciada, portanto só por volta de 2024 é que poderão surgir novos processos hídricos. Atualmente, o nosso país apresenta uma potência instalada de 5400 MW.

De todas as energias renováveis, é a energia solar que mais apresenta cortes de incentivos do estado.

Embora se verificasse um desaparecimento dos incentivos, continua a compensar um investimento nas energias alternativas, pois o investimento é seguramente recuperado. Todos estes fatores influenciam num desaparecimento gradual de empresas e aumento do número de técnicos no desemprego. O governo anterior definiu uma meta de produção fotovoltaica de 1000 MW de potência entre 2012 e 2020, sendo este valor reduzido para metade segundo o novo executivo, interrogando diversas empresas do setor sobre o motivo da origem deste radical corte num país onde o sol é abundante. Nos dias que correm, a potência instalada é de 163 MW, que representa cerca de 0,9% do total nacional.

Relativamente à geração eólica, o atual governo apresenta-se bastante reticente e reduz o valor das metas a serem alcançadas em 2020, revendo os valores para os 5300 MW, estando o anterior valor situado nos 7000 MW.

A crise e a austeridade estão a afetar as energias renováveis, com os bancos cada vez mais a dificultarem o financiamento. Atualmente, a potência instalada é de 4103 MW, representando 22,5% do total.

A produção de energia elétrica a partir de fontes de energia renovável registou, no período de janeiro a novembro de 2012, uma quebra de 21% relativamente a igual período de 2011. Este comportamento deve-se fundamentalmente à componente hídrica, que decresceu 52%. No mesmo período, a produção eólica subiu 11% e a fotovoltaica 37%. [19]

De forma a reduzir as emissões e cumprir o protocolo de Quioto, Portugal conta com uma política energética para as Alterações Climáticas que é a seguinte:

- O Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC), que contempla um conjunto de políticas e medidas de implementação setorial para a redução de emissões de gases com efeito de estufa;
- O Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão para o período 2008-2012 (PNALE II), que define as condições a que ficam sujeitas às instalações abrangidas pelo comércio europeu de licenças de emissão de gases com efeito de estufa (CELE);
- O Fundo Português de Carbono (FPC), instrumento financeiro do estado Português para atuação no mercado de carbono tendo em vista assegurar o cumprimento das metas nacionais em matéria de alterações climáticas através do recurso aos mecanismos de flexibilidade do Protocolo de Quioto. Visa ainda o apoio a projetos nacionais de redução de emissões;
- A Estratégia Nacional de Adaptação as Alterações Climáticas (EN AAC), estruturada sob os seguintes objetivos: informação e conhecimento; reduzir a vulnerabilidade e aumentar a capacidade de resposta; participar, sensibilizar e divulgar; cooperar a nível internacional.

Estes planos são implementados de modo a desenvolver uma sustentabilidade ecológica no país e fazer com que esta reduza as emissões de carbono.

No entanto, os principais fatores de incerteza relativamente ao cumprimento por Portugal a estas metas mantêm-se em duas áreas:

- Na Floresta, Reflorestação e Alterações do Uso do Solo: são principais fatores de risco a ocorrência de incêndios;
- No Comércio Europeu de Licenças de Emissão: a utilização da reserva para novas instalações abaixo do inicialmente antecipado pelos promotores nos setores cobertos poderá levar a uma não utilização de licenças previamente reservadas. [20]

2.5 - Cenários Energéticos - Os novos paradigmas

Futuramente, prevê-se um aumento do consumo primário de energia, permanecendo o petróleo como a fonte de produção de energia mais dominante, seguida pelo carvão. A utilização do gás natural será cada vez maior, e o recurso à energia hídrica permanece praticamente constante embora existam planos de exploração dos recursos hidroelétricos em países em vias de desenvolvimento. Espera-se que a utilização da biomassa aumente a cada ano que passa, estando aumentando acentuadamente nos países desenvolvidos. Estes resultados demonstram que os combustíveis fósseis continuarão a dominar nos próximos anos, e em fase de crescimento.

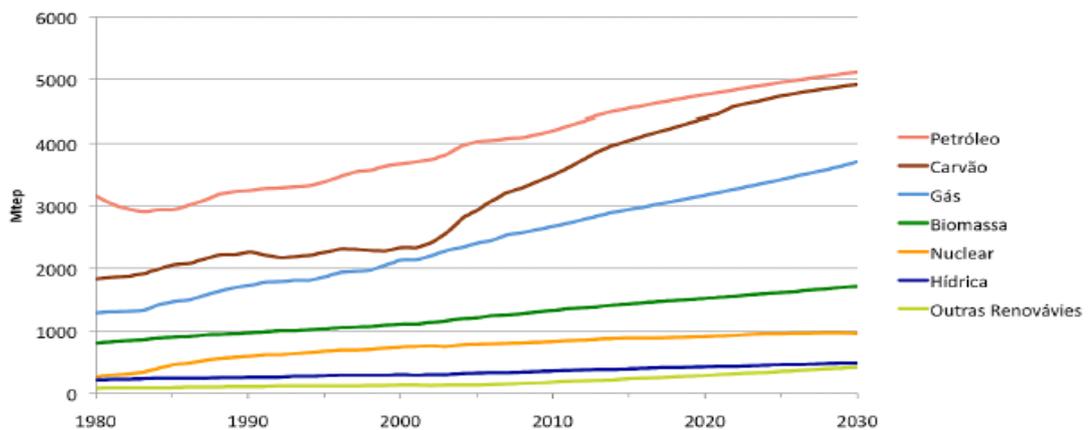


Figura 2.10: Consumo de energia primária a nível mundial, por fonte energética. [21]

O modelo atual de energia, principalmente baseado no uso de combustíveis fósseis é pouco sustentável. É necessário investir na eficiência e poupança, assim como na implementação de energias renováveis, tendo em conta os impactos ambientais e o custo socioeconómico.

Os valores ilustrados na figura atrás mencionada, representam a importância da aposta nas energias renováveis a longo prazo. O estudo e os dados são baseados na política energética adotada por parte de cada nação.

2.6 - Sínteses e conclusões

Observando o cenário atual, constata-se que os recursos naturais, sobretudo o sol, não estão a ser devidamente aproveitados surgindo necessidade de continuidade de investimento e de estudo nesta área. O esforço português tem-se concentrado sobretudo no investimento de energia eólica, no qual Portugal se destaca acima da média europeia, podendo obter resultados de igual proporção na energia solar, biomassa e maremotriz.

É necessário investir nestas formas de energia alternativa e diminuir a dependência de importações de energia primária, o que se traduz num fator positivo para a economia da nação, assim como inovar ao nível das tecnologias de aproveitamentos por forma a torná-los mais efetivos no aproveitamento de energias limpas e renováveis, tal como se discutirá nos próximos capítulos.

Capítulo 3

Tecnologias para aproveitamentos de energias renováveis

3.1 - Introdução

O aproveitamento de um tipo de energia renovável representa a forma pela qual esta é extraída da natureza. Existem diversas formas de transformar energia solar, cinética, potencial (entre outras) e transformá-las em energia elétrica.

Esta parte da dissertação é dedicada ao estudo dessas formas de transformação utilizadas para fazer uso da energia, não só dentro do leque de conversão eletromecânica nas energias renováveis utilizadas, mas também referente a outras tecnologias como a solar e as pilhas de combustível, apesar do foco central do trabalho.

As primeiras aproveitam um movimento de rotação e, a partir daí, transformam energia cinética em energia elétrica através de um gerador, pertencendo esta atividade humana já ao quotidiano e estando relacionada com as necessidades primárias do planeta.

Todos os tipos de utilização de energia, convencionais ou alternativas, agridem com maior ou menor intensidade o meio ambiente, podendo discutir-se os prós e contras de cada uma delas. Inicialmente é feita uma abordagem geral ao método de funcionamento de cada aproveitamento e após isto é analisada a utilização dos geradores nestes.

3.2 - Soluções e tecnologias por tipo de fonte primária

Um sistema convencional de energia elétrica é constituído pela parte de geração (pode ser realizada em centrais convencionais ou através de produção dispersa), transporte (através de linhas elétricas e equipamento de alta tensão), distribuição (através de linhas elétricas e equipamentos de média tensão) e utilização (através de linhas e cargas em baixa e, eventualmente, em média tensão).

A conversão eletromecânica esteve até aos dias do aparecimento das formas de conversão de energias renováveis, ligada ao nível da geração da produção convencional. Com o surgimento da produção dispersa, foi possível integrar a geração a partir de conversão eletromecânica e não só, otimizando o aproveitamento das diversas formas de energias alternativas.

A produção convencional apresenta o aspeto ilustrado na figura abaixo, constituindo um sistema elétrico de energia organizado, com vários constituintes e envolvendo massas energéticas e económicas.

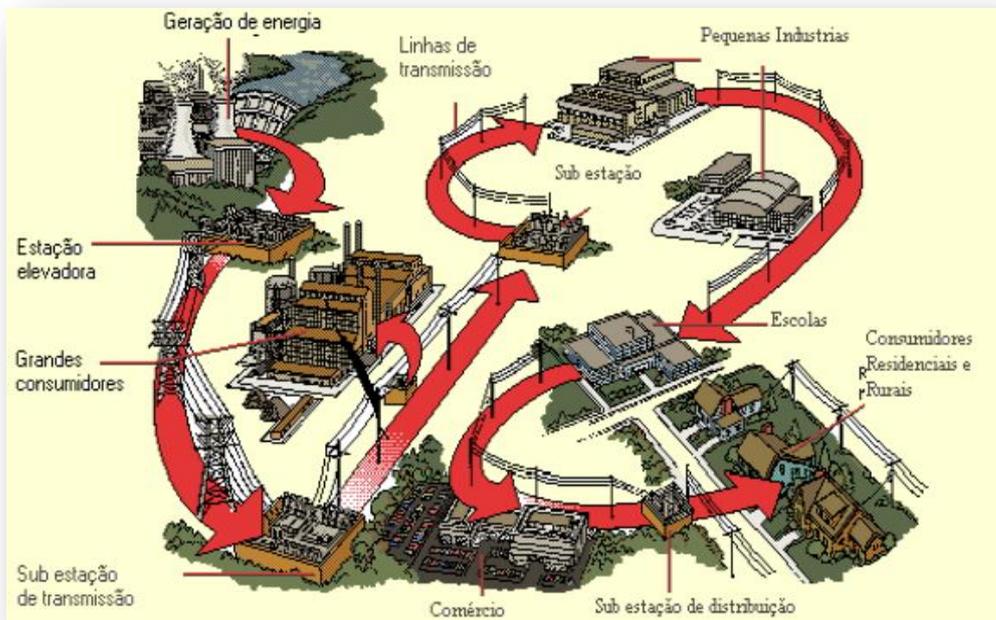


Figura 3.1: Organização de um sistema elétrico de energia. [22]

Atualmente a produção convencional funciona em diversos tipos de centrais, sendo estas classificadas de:

Centrais de Base - destinadas a fornecer a maior parte da energia elétrica de forma contínua. Centrais de grande potência.

Centrais de Ponta - exclusivamente projetadas para cobrir a procura de energia nas horas de ponta. Devem poder ser colocadas em serviço rapidamente e também responder rapidamente ao aumento de carga.

Centrais de Reserva - têm por objetivo substituir total ou parcialmente as centrais de base em caso de avaria ou beneficiação destas.

Centrais de Emergência - destinadas a abastecerem consumidores que inesperadamente deixam de ser alimentados pela fonte de energia habitual. Pequena potência acionadas normalmente por motores diesel.

Centrais de Bombagem ou Armazenamento - são sempre hidroelétricas. Aproveita-se a energia das horas de vazio para efetuar a bombagem. Fornecem energia nas horas de ponta.

A conversão eletromecânica aproveita os princípios e processos de conversão de energia elétrica em energia mecânica e vice-versa.

Para além disto, desenvolve meios para a obtenção de modelos dos transdutores eletromecânicos. Esta forma de geração de energia envolve a troca de energia entre um sistema mecânico e um sistema elétrico através de um campo magnético. A energia é convertida de energia mecânica para energia elétrica uma vez que existe facilidade de transmissão e processamento.

Com a necessidade de encontrar soluções limpas e ambientalmente corretas, a utilização da produção de novas formas de energia através de fontes inesgotáveis levou à existência de uma nova estrutura de fornecimento de eletricidade designada de “produção dispersa”, produzindo energia descentralizadamente a partir de fontes de energia naturais e renováveis.

3.2.1 - Energia Hídrica

3.2.1.1 - Rios/Lagos

A energia hidroelétrica consiste na produção de energia elétrica através de uma queda de água situada a um nível superior, provocando movimento das pás das turbinas hidráulicas, transformando energia potencial gravítica em energia cinética e posteriormente, através de um alternador existente, transforma a energia cinética proveniente do movimento de rotação das pás em energia elétrica.

Em Portugal, a produção deste tipo de energia já esgotou os melhores sítios de localização dos grandes aproveitamentos. A potência aparente instalada na maioria deste tipo de aproveitamentos construídos no nosso país possui um valor superior a 10 MVA. [23]

A constituição desta envolve uma estrutura robusta e com valores económicos astronómicos, sendo efetuados projetos a longo prazo.

Uma central hidroelétrica apresenta inúmeros fatores que implicam na produção de valores como potência produzida e continuidade de serviço. Para tal, estas centrais são classificadas relativamente ao seu nível de potência, queda, caudal e tipo de aproveitamento especificado, representando características importantes para a designação desta.

As centrais podem ser classificadas como:

Centrais de Alta Queda - alturas de queda superiores a 200 metros ou 400 metros.

Centrais de Média Queda - alturas de queda entre os 20 e os 200 metros.

Centrais de Pequena Queda - alturas de queda inferiores a 20 metros. [24]

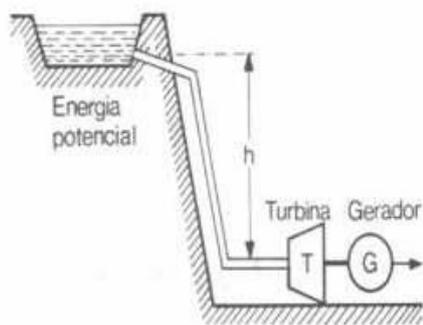


Figura 3.2: Queda útil de uma central hidroelétrica. [25]

I - Tipo de Aproveitamentos

Relativamente ao tipo de aproveitamento, este pode ser:

- Central a fio-de-água;
- Central de albufeira;
- Central de bombagem.

1.1 Fio-de-água

As centrais fio-de-água caracterizam-se por não possuírem uma grande capacidade de armazenamento e se localizarem junto a zonas com grandes quedas e cascatas. Como não armazenam muita água, as águas são imediatamente turbinadas ou, até mesmo, descarregadas em períodos com excesso desta. É o tipo de aproveitamento hidroelétrico mais barato, mas também é restrito, uma vez que nem todos os locais possuem condições propícias para a instalação de uma central que requer características como zonas com queda de água acentuada. Estas são centrais de base, funcionando em modo contínuo. Na figura 3.3, verifica-se esquematizado um aproveitamento deste tipo.

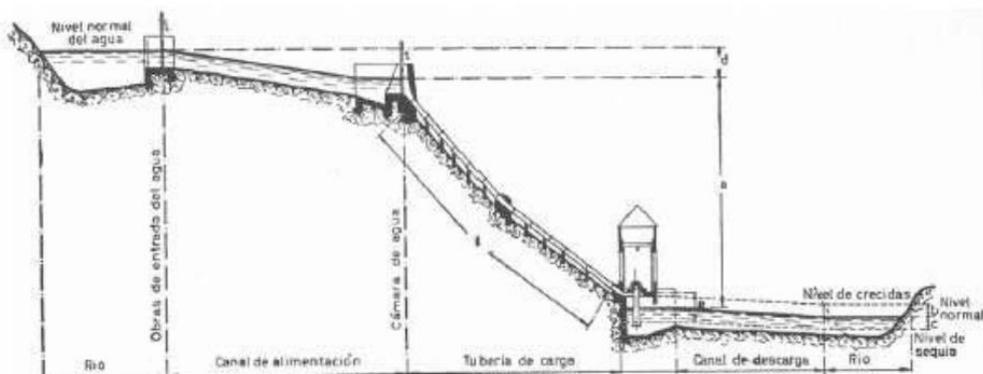


Figura 3.3: Esquema de aproveitamento a fio-de-água. [25]

1.2 Albufeira

As centrais do tipo albufeira são centrais que se destinam ao armazenamento de água, formando enormes lagos artificiais que são utilizadas para acorrer a picos de consumo, funcionando assim como uma central de ponta.

São caracterizadas pelo seu período de esvaziamento ser superior a 100 horas. Devido à sua capacidade de armazenamento, esta é capaz de armazenar a água durante longos períodos de tempo para a turbinar em épocas mais secas. Estas apresentam potências elevadas e são normalmente implementadas em zonas montanhosas.

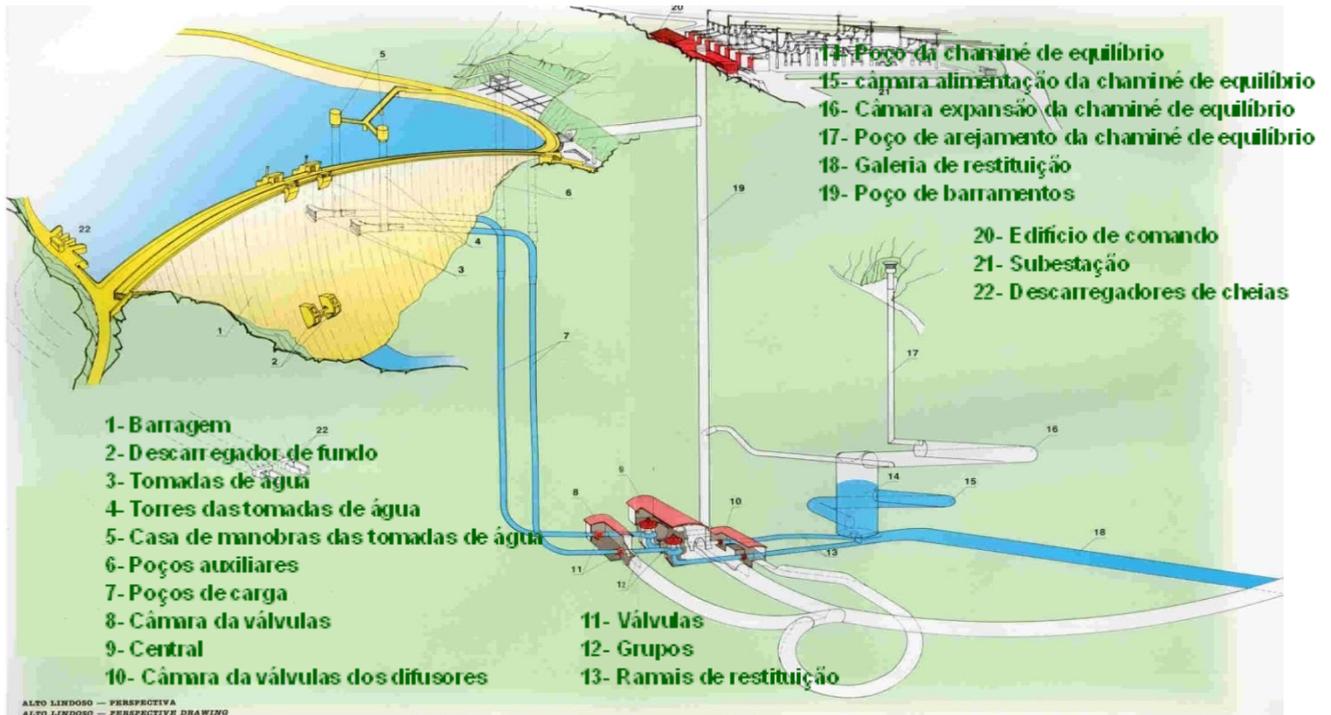


Figura 3.4: Esquema e constituintes de uma central do tipo albufeira. [24]

1.3 Bombagem

Os aproveitamentos hidroelétricos por bombagem são caracterizados por apresentarem dois reservatórios na sua constituição. O funcionamento é caracterizado pela bombagem da energia elétrica em excesso proveniente normalmente das centrais eólicas, do reservatório a um nível mais inferior para o reservatório no nível superior, isto nas horas de vazio. Nas horas de ponta, a água é turbinada pelo processo habitual, do reservatório situado a uma cota maior, para o reservatório situado a uma cota menor, produzindo energia.

Tipos de turbinas utilizadas

Existem dois tipos de turbinas utilizadas na produção de energia hidroelétrica, as turbinas de ação e as de reação. Nas turbinas de ação a água incide diretamente sobre a roda móvel através de jatos sendo um exemplo a turbina do tipo Pelton. Esta é utilizada em aproveitamentos com alta queda e um caudal baixo.

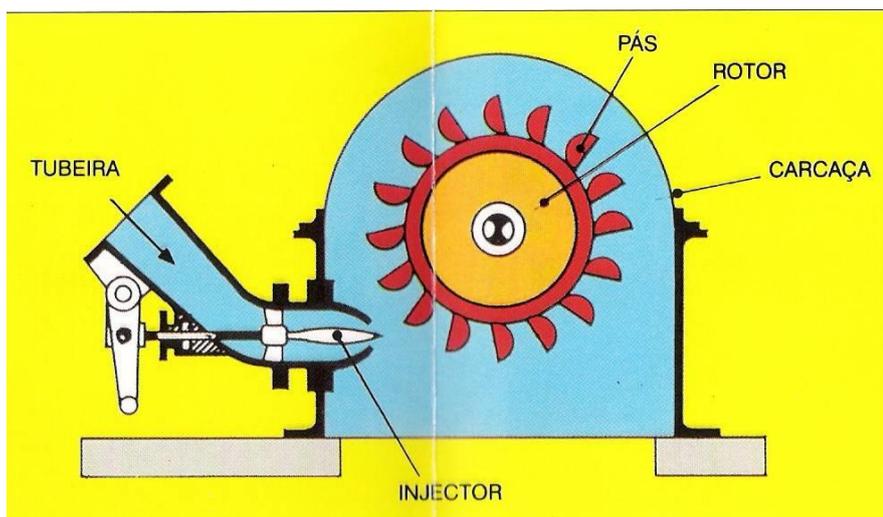


Figura 3.5: Esquema Turbina tipo Pelton. [26]

Relativamente às turbinas de reação, estas atuam no seio do fluido turbinado, onde a água penetra a roda móvel por todo.

A turbina do tipo Francis é uma turbina deste tipo e é bastante utilizada em aproveitamentos de média ou baixa queda.

A câmara de entrada reencaminha a água para o distribuidor, onde esta se desloca da periferia para o centro, caindo sobre as pás da roda, originando um movimento de rotação.

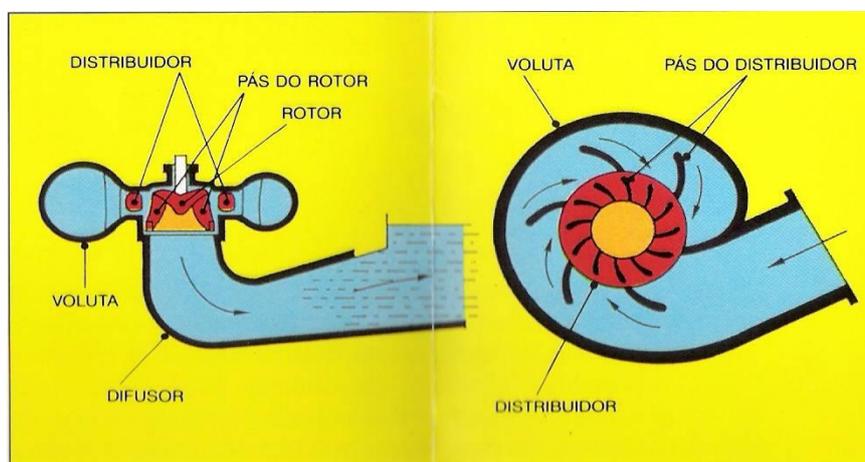


Figura 3.6: Esquema turbina tipo Francis. [26]

Uma turbina utilizada em aproveitamentos de baixa queda e grande caudal, isto é, aproveitamentos a fio-de-água, é a turbina Kaplan. Esta é uma turbina de reação que se diferencia da turbina do tipo Francis pelo seu menor número de pás e pela sua inclinação regulável.

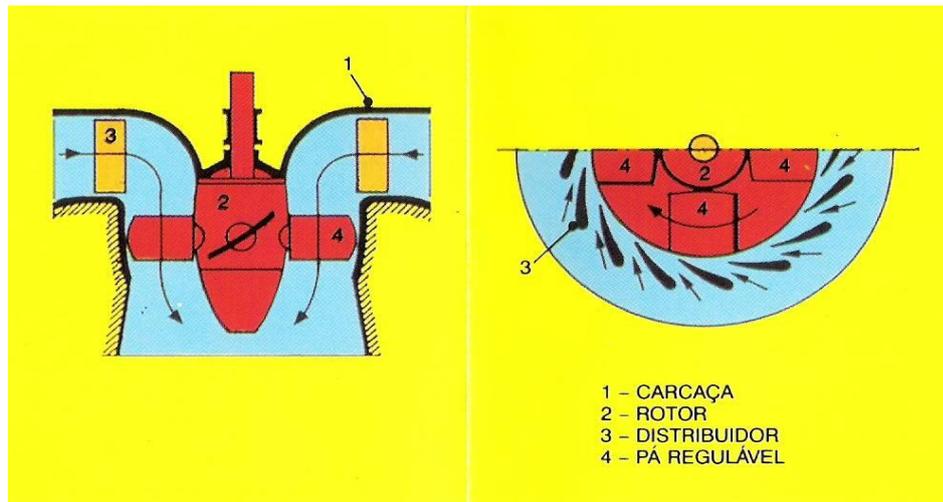


Figura 3.7: Esquema turbina tipo Kaplan. [26]

3.2.1.2 - Marés, Ondas e Correntes

Como verificado no capítulo anterior, existem diferentes formas de aproveitar a energia proveniente das marés, no entanto, para tal é necessário implementar a construção de centrais hidroelétricas para que se consiga aproveitar a energia potencial, usando a diferença entre a maré baixa e maré alta.

Deste modo, o aproveitamento da energia maremotriz baseia-se no mesmo princípio de funcionamento das centrais hidroelétricas. Esta não é diretamente controlável, uma vez que depende de características e condições naturais, mas é previsível a longo prazo, o que permite realizar um bom aproveitamento de energia.

As barragens construídas para aproveitarem a energia das marés têm um funcionamento que dita que quando o nível do mar sobe e a maré começa a entrar no reservatório, a água contida dentro desse reservatório é canalizada para uma grande bacia atrás da represa, assegurando uma grande quantidade de energia potencial. Quando a maré baixa, esta energia é convertida em energia mecânica através das turbinas que através da utilização de geradores irão produzir energia elétrica.

A bombagem na maré alta ou baixa pode ser utilizada para provocar a subida ou descida dos níveis do reservatório, de modo a aumentar o potencial de energia da fase de produção seguinte. Por exemplo, na bombagem na maré alta, é bombeada mais água para a zona de contenção durante a maré alta para que o volume extra de água movimente as turbinas durante o período de produção na maré baixa.

O método de funcionamento é semelhante ao das centrais hidroelétricas e as turbinas utilizadas são as do tipo bolbo, um tipo de turbina do tipo Kaplan, imersa no fluxo de água e conectada diretamente pelo eixo a um gerador. Este tipo de funcionamento é representado na figura 3.8:

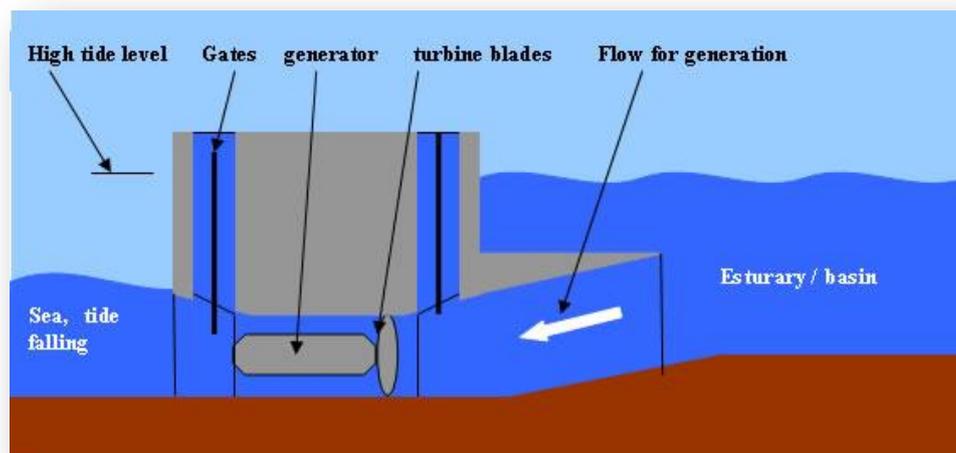


Figura 3.8: Esquema de funcionamento de uma barragem de marés. [27]

Relativamente ao deslocamento de massas de água, isto é, à energia cinética produzida diretamente pela energia das marés ou correntes marítimas, são utilizadas turbinas com algumas analogias com as que são utilizadas na produção de energia eólica.

Existem três tipos principais de turbinas utilizadas:

- **Turbina bulbo**

A turbina do tipo bulbo caracteriza-se por ser uma turbina com um gerador no seu interior. Isto significa que é muito eficiente em termos de espaço e tamanho - colocando o gerador dentro da turbina, a necessidade de uma unidade de alojamento separado é eliminada, o que significa que esta apresentará dimensões menores. Por outro lado, estas turbinas não podem ser mantidas sem interrupção do fluxo de água. Isto significa que quando é necessário efetuar manutenção, a turbina terá de parar a produção de energia durante esse período.

- **Turbina de aro**

Na turbina de aro o gerador está separado da mesma e ligado a um eixo que se move com esta. No entanto, a natureza mais delicada deste tipo de turbina, significa que é mais difícil de bombear a água através dele e regular a quantidade de energia que produz.

- **Turbina tubular**

As turbinas tubulares são as turbinas já comumente utilizados na geração de energia hidroelétrica. A grande vantagem de uma turbina tubular é que as lâminas podem ser ajustadas, podendo alterar a quantidade de energia produzida através deste efeito. Assim, lâminas menores irão gerar menos energia, enquanto lâminas maiores gerarão mais energia. Isso permite que a turbina funcione de forma mais eficiente, gerando apenas a quantidade de energia de que necessita sem desgaste excessivo. [28]

Esta forma de geração de energia, apresenta a vantagem de ser muito mais barata do que a construção de uma barragem de marés, para além de que não apresenta tão maus impactes

ambientais como estas. Para além disso, esta geração não afeta a vida marinha, ao contrário das barragens que interferem no sentido de migração dos peixes dos rios e do mar.

Uma vez que a água apresenta uma densidade superior à do ar, irão existir diferenças relativamente ao aspeto construtivo deste tipo de geração, uma vez que diâmetros de pás mais elevados invocarão num pior rendimento do gerador devido à dificuldade de movimento originada. A utilização de caixa multiplicadora de velocidades nestes casos não se revela com especial utilidade, uma vez que é difícil efetuar a manutenção da turbina, pois está submersa. Na figura 3.9, observa-se a comparação entre uma turbina eólica offshore e uma turbina utilizada para a produção de energia através do movimento de massas de água causada pelas marés, onde vemos que, para potências idênticas, o tamanho das pás irá variar de modo a se obter uma extração de energia mais rentável.

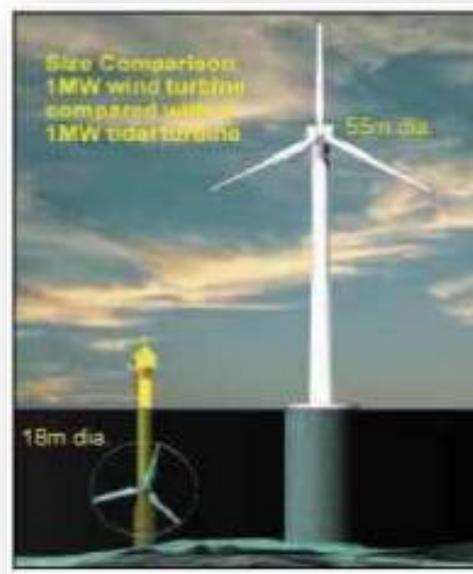


Figura 3.9: Comparação de uma turbina eólica offshore com uma turbina subaquática para a produção de energia através das marés. [29]

3.2.1.3 - Energia térmica dos oceanos

A Conversão de Energia Térmica dos Oceanos é um método que consiste na extração de energia da diferença de temperatura entre águas superficiais e profundas, através de um motor térmico. Esta tecnologia só apresenta viabilidade económica em diferenças de temperatura na ordem dos 20°C, sendo que, relativamente à água fria, a captação desta deve manter-se a uma profundidade inferior a 100 metros. A maior diferença de temperatura, localizada geralmente na zona do equador ou dos trópicos, fornece potencialmente uma quantidade enorme de energia. Assim, o desafio técnico principal apresenta-se em como produzir a maior quantidade de energia a partir de um pequeno rácio térmico, nomeadamente nos outros pontos do globo que não o do equador, onde a variação térmica não é tão acentuada. A água quente é utilizada para aquecer e vaporizar um líquido, normalmente um líquido com ponto de ebulição baixo. À medida que o vapor se expande, aciona a turbina. A água fria trazida do fundo é, então, utilizada para condensar o vapor novamente em líquido. [30]

3.2.1.4 - Energia das Ondas

A utilização da energia das ondas como forma de produção de energia elétrica encontra-se em constante desenvolvimento quando comparada com outras fontes de conversão de energia renovável.

Existem projetos de dispositivos junto à costa (onshore), situados a dezenas de metros da linha da costa e a profundidades da ordem dos 20 metros (near-shore), ou dispositivos afastados da costa, sendo estes sistemas flutuantes, onde a energia transportada pelas ondas é maior (offshore).

Na utilização de sistemas offshore, a dificuldade de acesso ao equipamento é um fator limitativo, pelo que a manutenção do próprio sistema deve ser a menor possível. Este fator é decisivo na escolha do equipamento, uma vez que, normalmente, máquinas que solicitem escovas no seu aspeto construtivo não serão apropriadas.

Todos os componentes deverão apresentar a capacidade de “sobreviver” à maior parte dos estados do mar. As diversas formas de captação do recurso natural poderão levar a diferentes conceitos de aproveitamentos, exigindo por isso, tecnologias distintas, ainda em fase de experimentação e investigação, incluindo o tipo de gerador que melhor se adaptará às exigências da aplicação. [31]

A grande parte dos geradores elétricos utilizados são idênticos aos utilizados na geração de energia eólica, registando-se assim uma recorrência a máquinas síncronas como assíncronas, existindo a possibilidade de operação a velocidades diferentes da velocidade da rede.

Existem três conceções básicas na disposição de sistemas para efetuarem o aproveitamento da energia das ondas, como podemos verificar na seguinte figura, e abaixo serão descritos mais pormenorizadamente os aproveitamentos mais importantes.

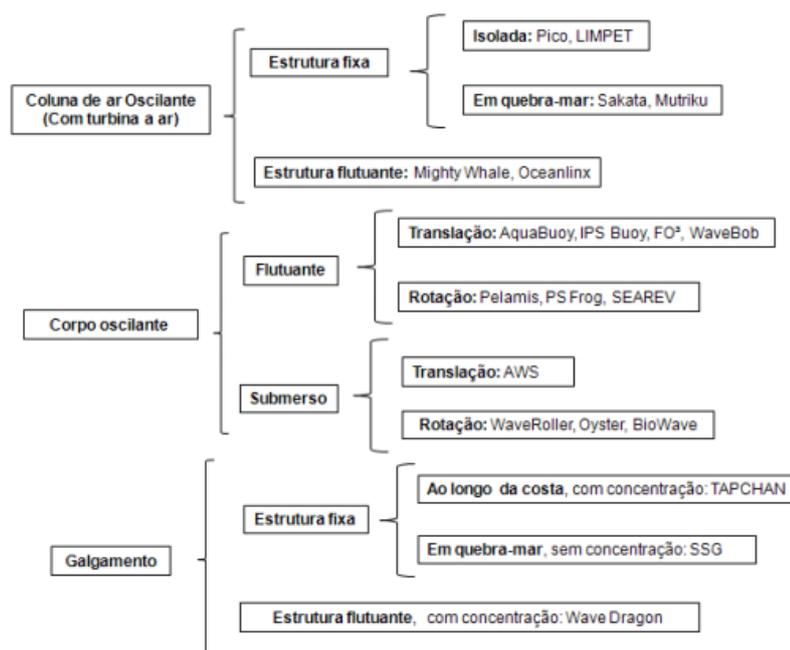


Figura 3.10: Formas de extração de energia através das ondas. [32]

- **Coluna de ar oscilante**

O sistema de coluna de ar oscilante caracteriza-se por se situar próximo da costa onde a sua base está em contato direto com a água, sendo esta impulsionada pelo movimento oscilatório provocado pelas ondas que irão acionar a turbina. A sua estrutura pode ser fixa ou flutuante, e é constituída normalmente por betão. Este método é provavelmente o mais simples e fiável para este tipo de conversão de energia. A sua estrutura apresenta-se semi-submersa, onde a turbina instalada no topo da câmara será acionada, devido à pressão criada, a qual converte energia mecânica, acionando um gerador. Esta envolve projetos como o LIMPET, Sakata e Oceanlinx.

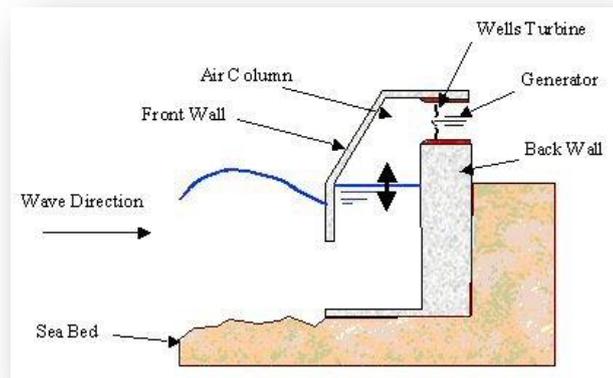


Figura 3.11: Esquema de funcionamento do sistema com coluna de ar oscilante. [33]

- **Corpo Oscilante**

O aproveitamento da energia das ondas através do uso de tecnologia de corpo oscilante pode ser à superfície (flutuante), ou submerso. Em ambos se utiliza o movimento de translação e rotação como forma de produção. A principal vantagem destes face à anterior é a menor dependência das condições da costa, sendo ideais para o aproveitamento de energia das ondas em escalas maiores. Contudo, também existem desvantagens, tais como os acessos para manutenção, interferências com navegação e pesca e, até mesmo o transporte de energia para terra.

- **Corpo Oscilante Flutuante - Translação**

Aquabuoy

O AquaBuoy é um dispositivo do tipo absorção pontual. Surgiu como resultado da combinação de duas tecnologias precedentes: o dispositivo de absorção pontual IPS OWEC Buoy, e o dispositivo designado por HosePump.

Este último consiste numa mangueira de borracha reforçada cujo volume interno é reduzido e expandido respetivamente quando a mangueira é esticada e comprimida, agindo desse modo como uma bomba. O dispositivo AquaBuoy consiste em quatro elementos constituintes: boia, tubo de aceleração, pistão e dois dispositivos HosePump.

O movimento do pistão causa a extensão ou compressão das bombas que estão localizadas em lados opostos deste. Então, a água do mar é enviada para um acumulador de alta pressão,

e posteriormente é direcionada a um sistema de conversão em energia elétrica que consiste num acoplamento de uma turbina do tipo Pelton e de um gerador. [34]

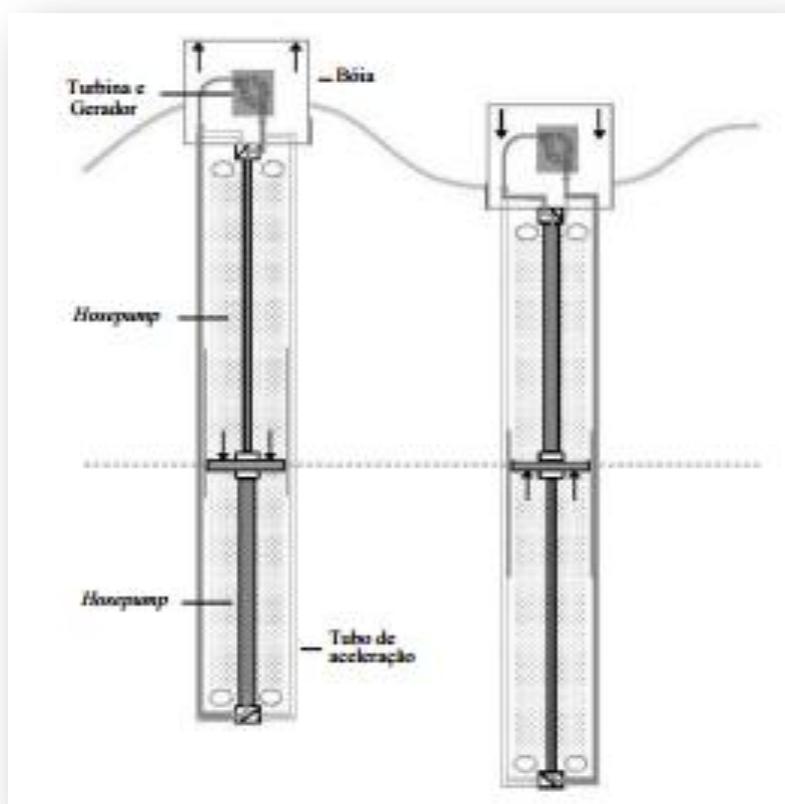


Figura 3.12: Modelo de funcionamento de um tipo de aproveitamento de corpo oscilante, AquaBoy.[34]

- **Corpo Oscilante Flutuante - Rotação**

Pelamis

Este tipo de conversão está disposto longitudinalmente e é composto por quatro módulos cilíndricos semi-submersos, unidos por articulações flexíveis. Estas, movimentando-se com a ondulação, bombeiam óleo sob alta pressão para motores hidráulicos que acionarão geradores elétricos de indução, operados a velocidade fixa, sendo por fim efetuado o transporte da energia para a costa, por cabo. A potência nominal de um dos conversores está fixada em 750 kW.

Este conversor dispõe-se ao longo do sentido de propagação das ondas devido à flexibilidade do seu sistema, gerando desta forma um efeito de bombeamento progressivo, associado à passagem da onda. [35]

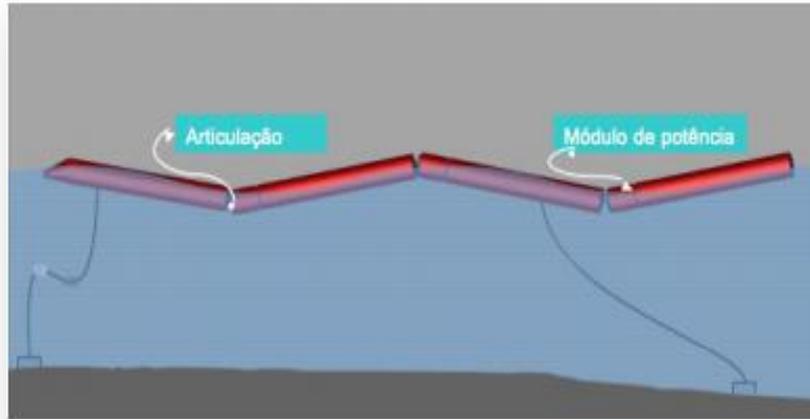


Figura 3.13: Ilustração do funcionamento do modelo Pelamis. [35]

- Corpo Oscilante Submerso - Translação

Archimedes Wave Swing

Este método de conversão é formado por dois cilindros ocos que com a passagem das ondas a pressão exterior varia e resulta num movimento oscilatório vertical do cilindro em relação à base, oscilações estas que acionam um gerador ou cilindro hidráulico de modo a extrair energia. Este sistema está diretamente ligado ao gerador elétrico, tal como tem vindo sendo a ser utilizado nas turbinas eólicas como alternativa à existência da caixa de velocidades, o que leva a um aumento de eficiência, fiabilidade e robustez.

Apesar de apresentar algumas desvantagens, o gerador síncrono de ímãs permanentes apresenta uma elevada eficiência e menores custos relativamente a soluções convencionais neste tipo de aproveitamento. [36]

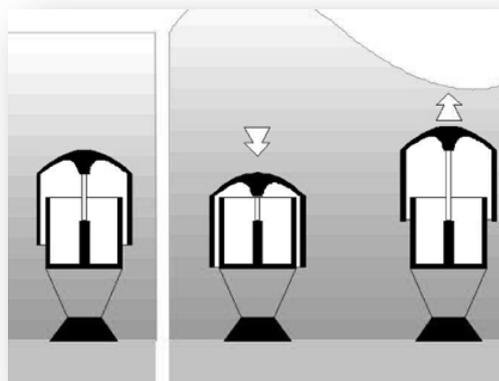


Figura 3.14: Princípio de funcionamento do sistema AWS. [36]

- **Corpo Oscilante Submerso - Rotação**

WaveRoller

O WaveRoller consiste numa placa ancorada ao fundo do mar em que o movimento para trás e para a frente da onda move a placa, transferindo energia cinética criada para uma bomba de pistão.

Uma série de placas pode ser usada para criar uma unidade de parques de dispositivos e produzir maior energia. Neste tipo de parques, uma série de bombas de pistão cria uma grande pressão que é introduzida num sistema de recolha e que é conduzida ao grupo motor/gerador hidráulico para produzir eletricidade. Uma placa individual de produção é projetada para produzir uma capacidade nominal até 600-800 kW de energia elétrica, dependendo do local. [37]

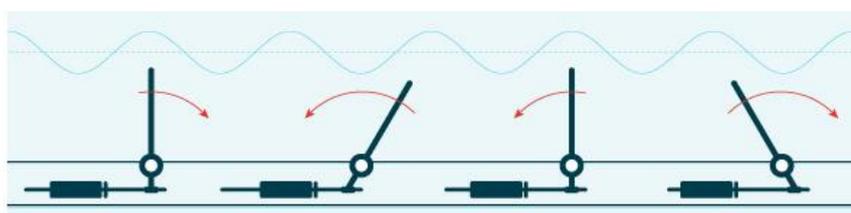


Figura 3.15: Princípio funcionamento do WaveRoller. [37]

- **Galgamento**

O galgamento corresponde ao encaminhamento das ondas para reservatórios elevados acima do nível do mar, o que é feito quando as ondas transpõem uma rampa de separação do reservatório com o mar. Quando a água armazenada volta para o mar, sendo despejada, passa através de uma turbina hidroelétrica de baixa queda, sendo este funcionamento semelhante ao funcionamento de uma central mini-hídrica.

A velocidade a que ocorre a conversão é baixa e variável, pelo que é rentável utilizar um gerador de ímãs permanentes, visto que a caixa de velocidades é inexistente e ficam reduzidos os custos e perdas de manutenção. [38]

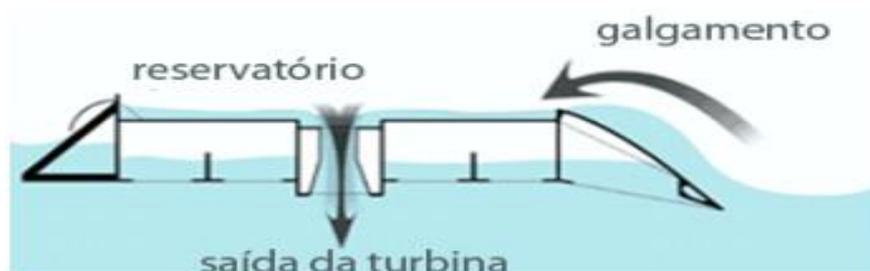


Figura 3.16: Dispositivo Wave Dragon. [38]

A melhor solução a utilizar para cada tipo de aproveitamento depende do tipo de tecnologia utilizada e da topologia adotada no dispositivo de geração.

O tipo de aproveitamento varia consoante a velocidade da água e a sua quantidade, consequentemente os geradores a utilizar também serão utilizados mediante as características exigidas.

3.2.2 - Energia Eólica

A forma de converter a energia cinética do vento passa pela utilização dos aerogeradores. Os aerogeradores modernos, normalmente também chamados de geradores eólicos, têm beneficiado de grandes progressos nos últimos anos. Apesar de eficazes e seguros, a instalação necessita de um rigoroso cumprimento de normas e um acordo com as populações mediante o desenvolvimento do projeto.

Na sua estrutura física mais comum, um aerogerador possui um mastro entre 50 a 110 metros de altura onde no seu topo se encontra uma estrutura equipada com um rotor de eixo horizontal e três hélices que são movimentadas mediante a velocidade do vento. O diâmetro varrido por estas varia de 40 a 120 metros, mediante o tamanho da torre e o vento provoca uma rotação nas hélices de 10 a 25 rotações por minuto. A energia mecânica é assim transformada em energia elétrica mediante a utilização de um gerador elétrico incorporado no topo deste. Os equipamentos modernos apresentam normalmente níveis de ruído entre 52 e os 55 dB.

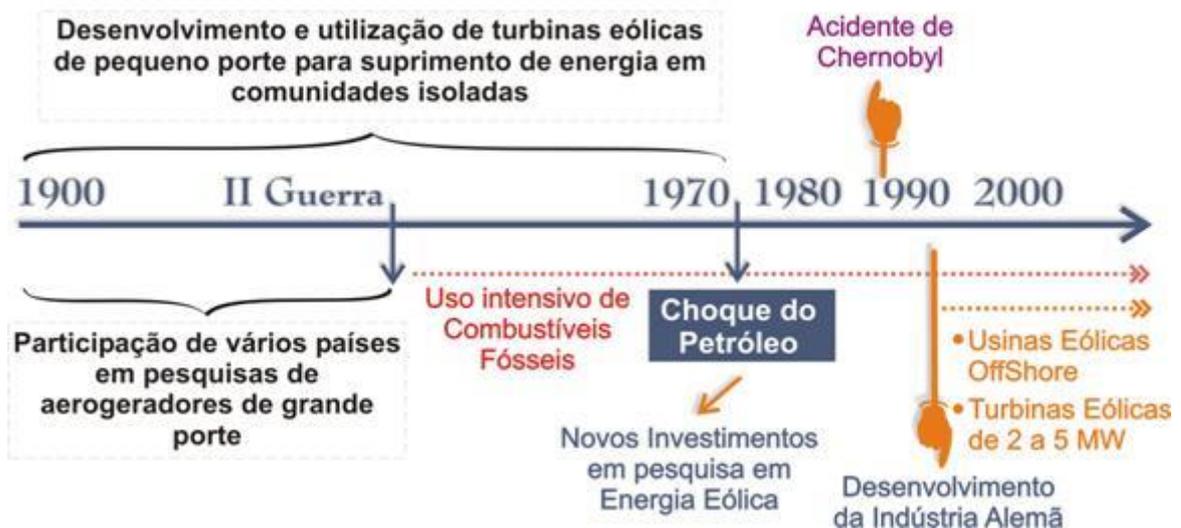


Figura 3.17: Nota histórica mediante a evolução dos aerogeradores. [39]

Há também sistemas de pequena potência (microgeração). No nosso país, a instalação de um aerogerador cujo raio não ultrapasse os 1,5 metros e não suba acima dos 4 metros do topo da construção, não necessita de licença camarária.

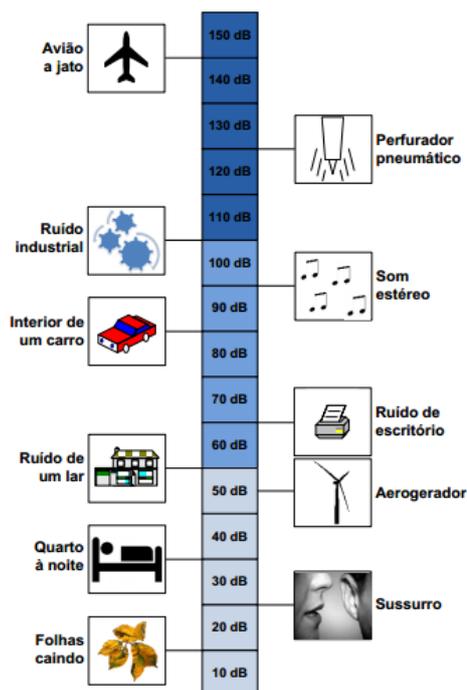


Figura 3.18: Escala de ruído de um aerogerador. [39]

Mediante as suas características e finalidade de aplicação, existem três tipos de sistemas eólicos. Estes podem ser de grande dimensão e apresentarem um funcionamento conectado à rede elétrica, sistemas híbridos de média dimensão e sistemas eólicos isolados, de pequenas dimensões.

No primeiro conjunto, os aerogeradores funcionam agrupados, constituindo parques eólicos com elevadas dimensões, estando conectados desde o nível da Média Tensão até ao nível da Muito Alta Tensão.

A utilização dos sistemas híbridos tem por finalidade conjugar energias e é usada maioritariamente em pequenas redes ou em aplicações especiais como a bombagem e dessalinização de águas. A título de exemplo de utilização, são muitas vezes utilizados sistemas híbridos que combinam aerogeradores eólicos com sistemas fotovoltaicos.

Os sistemas eólicos isolados apresentam uma pequena dimensão e a sua utilização é focada sobretudo na bombagem de água e produção de energia para aquecimento.

Para a implementação de um parque eólico é necessário proceder a estudos de diversos parâmetros, tais como:

- Existência de recurso eólico;
- Restrições Ambientais e ordenamento territorial;
- Proximidade de projetos semelhantes;
- Acessibilidades;
- Arborização existente e risco de incêndio;
- Identificação cadastral.

É necessário definirem-se regras de forma clara para que se viabilizem as condições técnicas que permitam a integração da produção de energia eólica nas redes elétricas, com o

principal objetivo de se realizar uma exploração eficiente e segura, garantindo a qualidade do serviço realizado.

A integração deste tipo de produção apresenta alguns problemas, nomeadamente nas variações de tensão, devido à alteração dos diferentes estados do sistema (ligado/desligado), qualidade da onda, congestionamentos nos ramos, dificuldades na gestão técnica do sistema e problemas na estabilidade e no comportamento dinâmico.

Ao nível da qualidade de onda, podem-se presenciar duas situações. A primeira consiste no chamado efeito de flicker, onde a existência de variações de tensão muito rápidas e curtas, devidas às variações rápidas no sistema de conversão, têm como consequência a tremulação das lâmpadas. Este fenómeno é bastante presenciado nas habitações e pode ser evitado através da existência de uma resposta elétrica e mecânica adequada, utilizando filtragem ao nível da eletrónica de potência.

O segundo parâmetro que caracteriza a qualidade da onda produzida através da integração da produção eólica é a injeção de harmónicos na rede. Esta anomalia da qualidade da onda em corrente alternada é causada devido à existência de frequências múltiplas de 50 Hz injetadas por baterias de condensadores ou através dos conversores de eletrónica de potência.

Como consequência direta, existirá um aquecimento de transformadores, motores de indução e baterias de condensadores, tornando-se assim necessário implementar limites toleráveis para esta taxa de distorção.

Relativamente à existência de congestionamentos em ramos do sistema, existem situações que poderão surgir da existência de saturações ao nível da rede de distribuição ou transporte, implicando a necessidade de analisar a existência destes em duas etapas distintas, a verificação na rede de transporte e a verificação ao nível da rede de sub-transmissão e distribuição.

No que toca à alteração da estabilidade transitória, as proteções dos parques eólicos são muito restritivas, estando definidas para defeitos até 8% do valor da tensão nominal as máquinas síncronas e 2% nas máquinas assíncronas, assim como alteração de até 0,2Hz ao nível de desvios da frequência.

Para retificar os defeitos são colocados dispositivos FACTS que irão injetar potência reativa durante a ocorrência de um curto-circuito, evitando a saída de produção do parque eólico.

3.2.2.1 - Tipos de Turbinas

Os aerogeradores são classificados mediante a posição do eixo da turbina, podendo esta estar disposta verticalmente ou horizontalmente.

A primeira disposição apresenta a vantagem de não necessitar de mecanismos que façam o ajuste à procura da direção do vento, no entanto, estas apresentam os ângulos de ataque e deslocamento em relação à direção do vento, alterados, limitando deste modo o seu rendimento e causando acentuadas vibrações na sua estrutura. Para esta configuração, existem dois tipos, a turbina de Savonius e a de Darrieus.

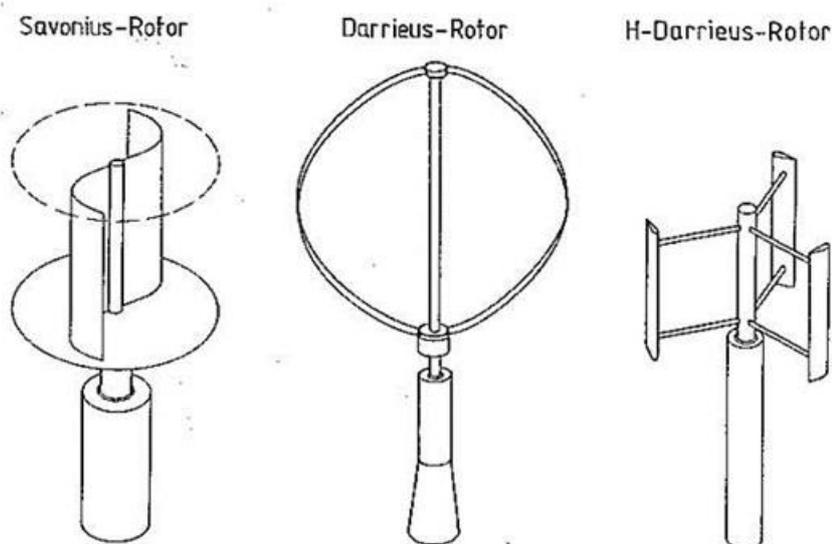


Figura 3.19: Diferentes turbinas de eixo vertical (Savonius e Darrieus). [40]

As turbinas do tipo Savonius apresentam as pás unidas ao seu eixo vertical e possuem uma curva de rendimento em relação à velocidade, bastante semelhante em relação com as turbinas de eixo horizontal.

As turbinas de Darrieus são constituídas por pás que se unem à extremidade do eixo e apresentam uma maior probabilidade de sofrerem danos, pelo que perdem uma vantagem competitiva comparativamente com as turbinas de Savonius.

Relativamente às turbinas de eixo horizontal, estas são as mais utilizadas e são aplicadas na maior parte dos parques eólicos, utilizados na produção de energia elétrica. A sua estrutura é constituída por uma turbina de duas ou mais pás, e devido à posição relativamente ao eixo, esta configuração necessita da disponibilidade de existência de um mecanismo que permita o posicionamento do eixo da turbina em relação à direção do vento.

Os principais modelos das turbinas com o eixo disposto horizontalmente diferem na sua constituição quanto ao tipo de utilização de que são alvo e quanto ao número de pás existentes.

Neste tipo de turbinas existem dois modelos. As turbinas de rotor multipás, que são utilizadas sobretudo na bombagem de água (no caso da energia hidroelétrica), e caracterizam-se por apresentarem um bom rendimento para velocidades relativamente baixas de vento, facto esse que limita a potência máxima extraída por área do rotor. O segundo modelo, são as turbinas de rotor com duas ou três pás, que se caracterizam por apresentarem uma boa relação entre potência extraída e área de varrimento do rotor, motivo pela qual são mais utilizadas.

A figura 3.20 ilustra os diversos constituintes deste tipo de aerogerador:



Figura 3.20: Diversos constituintes de um aerogerador.

Uma vez que são desenvolvidas forças aerodinâmicas nas pás do rotor, é necessário que se usem princípios para uma otimização da extração de potência e regular a velocidade, usando-se assim os reguladores de velocidade stall e os reguladores de velocidade pitch. Nos reguladores de velocidade stall as pás do rotor são fixadas no ângulo de passo, não podendo girar em torno do eixo longitudinal. Na regulação de velocidade via ângulo pitch, este atua sempre que a potência nominal é ultrapassada devido à velocidade do vento, obrigando as pás a mudarem o ângulo de passo para alterarem o ângulo de ataque.

A transformação de energia mecânica em energia elétrica é conseguida através do rotor do gerador elétrico. O rotor é a parte móvel do sistema eólico que permite esta transformação, captando energia pelas pás em rotação, ficando o rendimento do sistema diretamente influenciado à configuração deste.

Atualmente existem várias alternativas relativamente aos geradores a serem incorporados nos sistemas eólicos, tais como geradores de corrente contínua e geradores de corrente alternada, onde dentro destes últimos podemos encontrar geradores síncronos e geradores assíncronos.

3.2.3 - Biomassa

A evolução da tecnologia dos equipamentos que recorrem à biomassa permitiu que se atingissem valores de rendimento idênticos, aumentando a qualidade destes e equiparando-os aos sistemas convencionais utilizados na queima de combustíveis fósseis.

A combustão da Biomassa constitui é importante na geração de produtos, energia mecânica e eletricidade.

Existem várias formas de conversão de biomassa, no entanto ficam aqui as mais importantes, tais como a pirólise, gaseificação e combustão.

A biomassa pode dar origem a três diferentes tipos de energia:

- Energia térmica: Sob a forma de água quente, ar quente ou vapor.
- Energia mecânica: A substituição dos combustíveis convencionais pelo biocombustível pode alimentar motores de combustão.
- Energia elétrica, podendo ser originada das seguintes formas:
 - Ciclo de vapor - baseado na combustão que produz vapor que alimenta a turbina;
 - Turbina a gás - usa o gás resultante da gaseificação ou dos vapores da combustão anterior (ciclo combinado);
 - Motor alternativo - Utiliza biogás ou biodiesel.

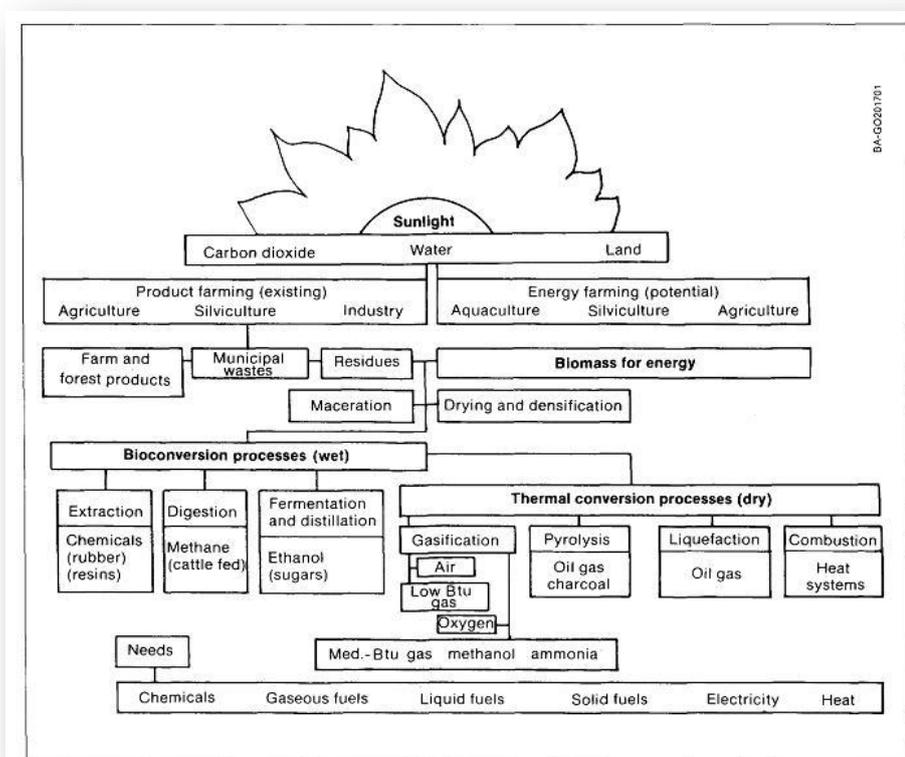


Figura 3.21: Diferentes formas de aproveitamento da biomassa. [41]

3.2.4 - Outras

3.2.4.1 - Energia Geotérmica

A energia geotérmica manifesta-se sob a forma de calor proveniente do interior da terra e pode ser aproveitada pela utilização direta, pela extração de calor através das bombas de calor geotérmicas e nas centrais geotérmicas, sendo aqui só destacada esta última, pois é a única em que a energia geotérmica é usada para produzir eletricidade.

Em centrais geotérmicas, o vapor, calor ou água quente de reservatórios geotérmicos fornecem a energia que move os geradores de turbina e produz a eletricidade.

A água geotérmica usada é depois devolvida ao reservatório através de um poço de injeção, para ser reaquecida, manter a pressão, e sustentar o reservatório.

Há três espécies de centrais geotérmicas. A espécie que construímos depende das temperaturas e pressões do reservatório.

Um reservatório de vapor “seco” produz vapor mas muito pouca água. O vapor é enviado por canos diretamente até uma central a vapor “seca” para fornecer a energia para mover o gerador de turbina .

Um reservatório geotérmico que produz maioritariamente água quente é chamado “um reservatório de água quente” e é usado numa central “relâmpago”. Água que varia entre 300-700 graus fahrenheit é trazida até à superfície através do poço de produção onde, ao ser lançada da pressão do reservatório profundo, parte da água transforma-se em vapor num “separador”. O vapor aciona então as turbinas.

Um reservatório com temperaturas entre 250-360 graus fahrenheit não é suficientemente quente para acender vapor suficiente mas ainda pode ser usado para produzir eletricidade numa central “binária”. Num sistema binário a água geotérmica é passada por um permutador de calor, onde o seu calor é transferido para um segundo (binário) líquido, que ferve a uma temperatura mais baixa do que a água. Quando aquecido, o líquido binário transforma-se em vapor, que, como vapor, se expande e move as lâminas de turbina. O vapor então é recondensado num líquido e reutilizado repetidamente. Neste ciclo fechado, não há nenhuma emissão para ar. [42]

3.2.4.2 - Fuel Cells / Pilhas de Combustível

As células a combustível são uma tecnologia que utiliza o hidrogénio e o oxigénio para gerar eletricidade e também vapor d’água quente resultante o processo químico na célula. A importância da célula está na sua alta eficiência e na ausência de emissão de poluentes quando se utiliza o hidrogénio puro. O hidrogénio pode ser obtido a partir de diversas fontes renováveis e também a partir de recursos fósseis, mas com muito menor impacto ambiental

Estas convertem-no em energia elétrica sem efetuarem qualquer tipo de combustão, apresentando um rendimento bastante elevado. O seu princípio de funcionamento é semelhante ao de uma bateria, onde hidrogénio reage com o oxigénio do ar numa reação eletroquímica.

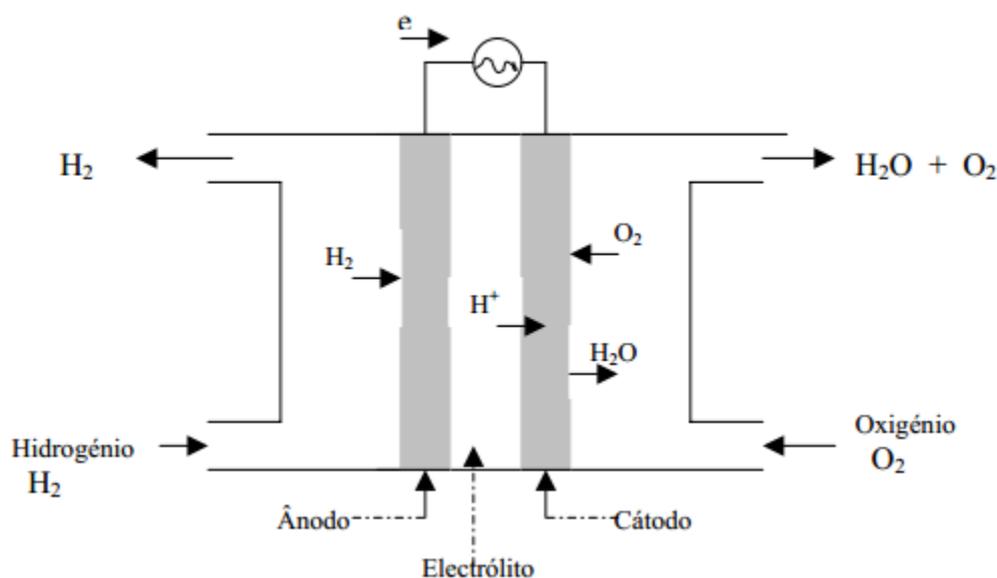


Figura 3.22: Processo eletroquímico que ocorre numa pilha de combustível. [43]

As pilhas de combustível são classificadas mediante o tipo de eletrólito que utilizam, determinando este o tipo de reações químicas que ocorrem no interior da célula, dando origem a diferentes tipos de células.

Neste momento destacam-se os seguintes tipos de pilhas de combustível:

- Pilha de combustível alcalina;
- Pilha de combustível de carbonatos fundidos;
- Pilha de combustível de ácido fosfórico;
- Pilha de combustível de óxidos sólidos;
- Pilha de combustível com membrana permutadora de protões.

3.2.4.3 - Energia Solar

Como verificado no capítulo anterior, a energia solar é uma forma de energia que pode ser explorada de duas formas, a forma passiva e a forma ativa.

A forma passiva consiste no aproveitamento solar através da arquitetura dos edifícios, para o aquecimento da casa.

A forma ativa consiste na utilização de painéis solares e o consequente aproveitamento da energia do sol para a produção de energia elétrica ou para o aquecimento de águas.

Recorrendo a equipamentos esta forma de energia pode ser convertida em eletricidade (fotovoltaica e térmica) ou em calor (térmica).

Relativamente à forma ativa de aproveitamento da energia solar, sendo a única capaz de gerar energia elétrica, existem dois tipos de sistemas, os painéis fotovoltaicos e os coletores solares. Os primeiros destinam-se à produção de energia em grandes centrais ou ao nível doméstico, com o propósito de vender energia à rede, enquanto os segundos destinam-se ao aquecimento doméstico.

Os painéis fotovoltaicos podem operar em ligação à rede, ou isolados desta. Os primeiros são sistemas onde o excesso de energia produzida pode ser vendido, evitando o seu desperdício. Por outro lado, quando existe menor insolação, a ligação à rede é importante de modo a ser requisitada energia para que não ocorra um apagão.

Neste tipo de sistemas, não existe nenhum tipo de armazenamento de energia e são compostos por arrays de painéis fotovoltaicos, inversores DC/AC, cabos DC e aparelhagem de corrente DC e AC. Estes parques podem apresentar grandes dimensões, como parques fotovoltaicos em que é efetuada a venda à rede de energia elétrica, ou sistemas de menores dimensões instalados em telhados de residências.

Os sistemas fotovoltaicos isolados da rede são sistemas que apresentam armazenamento de energia sobre a forma de baterias e são utilizados porque a necessidade do consumidor em grande parte das vezes não coincide com as necessidades de produção energética, pelo que não existe desperdício de energia produzida. A utilização destes sistemas vai desde sistemas de iluminação, barcos ou qualquer outro dispositivo móvel onde é possível fazer uso ativo da produção de energia renovável.

3.3 - A escolha do gerador

3.3.1 - Geração por corrente contínua

A máquina de corrente contínua, cuja aplicação nestes sistemas é mais antiga que as máquinas de corrente alternada, pode operar como motor ou como gerador.

Quando opera como gerador, é usualmente designada por dínamo. O seu estator é constituído por pares de polos magnéticos, que se obtêm através da aplicação de uma corrente contínua nos enrolamentos do estator. Por esses enrolamentos, circularão correntes que produzirão um campo magnético que atravessará o rotor. O rotor é constituído por um certo número de condutores distribuídos em ranhuras. Os condutores encontram-se ligados ao comutador, ou coletor, e em série entre eles, resultando no aparecimento de uma corrente contínua nas escovas que fazem o contacto elétrico com o rotor da máquina, quando este gira.

Para a produção de energia elétrica, a deslocação das pás da turbina de acionamento produz um movimento relativo entre os condutores elétricos e o campo magnético, gerando dessa forma uma tensão aos terminais dos condutores do gerador elétrico. Normalmente são geradores que se utilizam em aplicações isoladas com o objetivo de carregar baterias, que acumulam a energia produzida para uso posterior. [44]

Como destacado, a produção de energia elétrica é, no essencial, realizada por via eletromecânica recorrendo a um gerador elétrico, e, existindo essencialmente três tipos de geradores (de corrente contínua, síncronos e assíncronos) com características e aptidões diferentes, interessa descrevê-los e discutir as suas utilizações mais vantajosas.

Este método de conversão de energia revela-se não muito útil, uma vez que necessita da existência de um banco de baterias relativamente grande e porque os aparelhos domésticos foram projetados para funcionarem em corrente alternada, devido às facilidades de transporte que esta apresenta.

Por outro lado, o preço e a exigência de elevada manutenção, aliados à prevalência e vantagens da corrente alternada, como dito, justificam que o gerador de corrente contínua tenha um interesse muito limitado.

3.3.2 - Geração por corrente alternada

Existem dois tipos de máquinas elétricas de corrente alternada, a máquina assíncrona e a máquina síncrona.

Os geradores síncronos rodam com uma velocidade de rotação igual à velocidade do campo girante (velocidade de sincronismo) e os assíncronos rodam com uma velocidade superior à velocidade de sincronismo, existindo escorregamento do rotor em relação ao campo girante.

Dentro das máquinas assíncronas, existem dois tipos: A máquina de rotor em curto-circuito ou rotor de gaiola (de esquilo) e a de rotor bobinado.

A máquina de rotor em curto-circuito é a que tem a constituição mais simples. O indutor situa-se no estator e o induzido no rotor.

O rotor é constituído por uma gaiola de cobre ou alumínio em curto-circuito.

Na máquina de rotor bobinado, o rotor é constituído por um enrolamento trifásico ligado ao exterior através de anéis coletores (montados no rotor) e escovas (fixas).

Relativamente à máquina síncrona, o enrolamento do estator é do mesmo tipo da máquina assíncrona e o rotor é constituído por enrolamentos que produzem polos magnéticos. Com isto, é necessário um circuito de excitação de corrente contínua.

As máquinas com velocidade de rotação mais baixas apresentam polos salientes e as de maior rotação, como acontece nos geradores de centrais térmicas, apresentam menor diâmetro e maior comprimento do rotor e polos internos.

Os alternadores revelam muita aplicação na produção de energia em centrais hidroelétricas ou até mesmo centrais térmicas, sendo o gerador de corrente alternada mais usual neste caso. Este tipo de geradores pode ser utilizado também em aplicações de pequenas potências.

Os geradores assíncronos utilizam-se em centrais elétricas, como, por exemplo, hidroelétricas, mini-hídricas e em aerogeradores para produzir energia elétrica a partir da energia eólica. Nas mini-hídricas, a solução mais comum é a utilização de geradores assíncronos, embora também se usem os síncronos e os geradores síncronos de ímanes permanentes se revelem bastante vantajosos nestes casos devido às suas características que requerem uma reduzida manutenção.

A grande desvantagem dos geradores assíncronos em relação aos síncronos tem a ver com o facto de que estes absorvem energia reativa da rede, o que obriga à utilização de baterias de condensadores para compensação do fator de potência.

Nas máquinas síncronas, existe a possibilidade de substituir, no seu papel de criar o campo magnético indutor, os enrolamentos indutores por ímanes permanentes.

As máquinas síncronas de ímanes permanentes têm cada vez mais uma maior utilização em baixas e médias potências, especialmente quando se necessita de velocidade variável, alto rendimento e respostas dinâmicas rápidas.

Praticamente toda a energia elétrica é produzida por geradores síncronos, no entanto estes são também utilizados em centrais de pequeno porte, grupos de geradores de emergência, como indústrias, hospitais aeroportos... Neste caso o gerador funciona de forma isolada, não estando ligado a nenhum sistema de energia.

3.3.3 - A escolha do gerador na energia eólica

Existem diversos tipos de geradores que podem ser utilizados numa turbina eólica, podendo estes operarem a uma velocidade constante ou a uma velocidade variável, mediante o modo de funcionamento da turbina.

Primeiramente podemos classificar os geradores assíncronos, ou de indução, em função das características construtivas do rotor dividindo-se assim em: gerador de indução de rotor bobinado e gerador de indução rotor gaiola de esquilo. Considerando as características rotativas da máquina primária, o gerador assíncrono pode ser de velocidade constante e/ou de velocidade variável. Por fim, se considerarmos a colocação do gerador de indução temos basicamente duas configurações, para operação interligada e/ou para operação isolada. [45]

No caso de funcionamento isolado, esses condensadores são indispensáveis para a criação do campo magnético da máquina.

O estator do gerador assíncrono é idêntico ao do gerador síncrono, se o rotor for em gaiola. Caso o rotor seja bobinado, a máquina é duplamente alimentada (pelo estator e pelo rotor). O gerador assíncrono apresenta-se como uma solução robusta, que necessita de manutenção mínima e ostenta uma longa vida de operação.

Em contrapartida, este gerador consome energia reativa, exigindo a compensação do fator de potência através do uso de condensadores. [46]

Na geração eólica através de geradores assíncronos, como estes apresentam uma velocidade de operação bem superior à da turbina, exige-se que entre a turbina eólica e o gerador seja incorporado uma caixa de velocidades.

O grupo eólico-elétrico assíncrono, quando conectado à rede através de um conversor de frequência ou quando duplamente alimentado, revela-se bastante flexível, atendendo perfeitamente as duas características da conversão eólico-elétricas da energia cinética dos ventos. Estes geradores necessitam de uma alimentação externa para produzir um fluxo magnético rotativo, podendo esta ser fornecida a partir da rede elétrica ou de baterias de condensadores, como dito. [47]

A família de geradores assíncronos utilizados nos sistemas de conversão eólicos está representada na seguinte figura, sendo eles:

- Gerador assíncrono com rotor em gaiola de esquilo, diretamente ligado à rede;
- Gerador assíncrono com rotor em gaiola de esquilo ligado à rede através de sistema de controlo de potência;
- Gerador assíncrono com rotor bobinado controlado através da frequência;
- Gerador assíncrono duplamente alimentado.

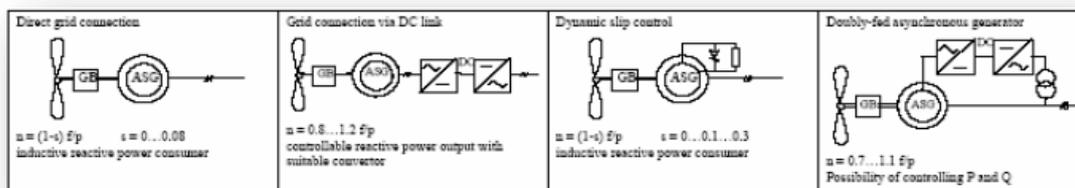


Figura 3.23: Diferentes soluções para geradores assíncronos. [48]

O gerador assíncrono com o rotor em gaiola de esquilo, diretamente ligado a rede, constitui uma solução robusta, de baixa manutenção e baixo custo que não injeta harmónicos de corrente na rede, e pode dispor de um soft-starter (dispositivo constituído por uma ponte de tirístores) que efetua a conexão à rede automaticamente. Este é o sistema mais antigo utilizado em unidades de produção de energia eólica.

O escorregamento, e consequentemente a velocidade, variam com o valor da potência gerada. Contudo a variação de velocidade é pequena e este sistema é classificado como sistema de velocidade fixa. [49]

Numa solução com dois pares de polos, este tipo de gerador pode rodar a duas velocidades diferentes, mas constantes, isto porque é efetuada uma mudança do número de polos do enrolamento do estator, dependendo unicamente da configuração e disposição dos enrolamentos. A sua manutenção, baixo custo e a não injeção de harmónicos de corrente na rede revela-se uma enorme vantagem, no entanto, a existência de um fator de potência indutivo exige a existência de baterias de condensadores.

Este apresenta uma ligação à rede bastante robusta e existe a possibilidade de se utilizarem conversores AC/DC/AC ou AC/AC, isto para que exista um trânsito de energia ativa e reativa de forma controlada, contudo, o uso da eletrónica de potência insere harmónicos na corrente.

A utilização de dispositivos de eletrónica de potência na ligação deste gerador, permite que a sua característica de funcionamento se torne complexa mas, no entanto, ganha as vantagens dos sistemas de velocidade variável, isto é, desempenho dinâmico maior, possibilidade do controlo de potência reativa e máxima extração de potência da turbina eólica.

Nos geradores assíncronos com o rotor bobinado existem duas configurações que são possíveis utilizar. A primeira consiste na disposição de um gerador com controlo de frequência efetuado através da eletrónica de potência, onde este irá atuar sobre o binário da máquina (escorregamento), controlando a potência ativa, mas, continuando a consumir potência reativa.

A outra configuração consiste na ligação de um circuito de extração de potência pelo rotor da máquina, sendo esta máquina duplamente alimentada e com capacidade de injeção na rede de potência ativa e reativa de forma controlada.

A segunda configuração apresenta um custo mais elevado que a primeira devido à existência de circuitos auxiliares de conversão, no entanto tem uma característica especial que a deixa funcionar como gerador, mesmo apresentando valores de escorregamento positivos.

Ambos os sistemas podem funcionar a uma velocidade variável, e usam conversores, podendo estes serem do tipo AC/DC/AC ou AC/AC.

Existe uma caixa de velocidades entre as pás e o rotor da máquina que possibilita a adaptação da velocidade de rotação da turbina à velocidade de rotação da máquina de indução.

Na geração através de geradores síncronos, nos grupos de maior potência (maior do que 1MW) normalmente o gerador síncrono é fabricado com um número muito grande de polos e para funcionar a uma frequência nominal baixa, fazendo com que sua velocidade de operação seja igual à da turbina, não necessitando do multiplicador de velocidade, usando pois um acoplamento diante a turbina e o gerador.

Porém, nos grupos de menor potência (menor do que 1MW), o gerador síncrono apresenta velocidade de operação bem superior à da turbina, exigindo-se uma caixa de velocidades elevadora entre a turbina e o gerador.

Se dotados de excitação convencional, estes geradores oferecem uma ampla capacidade de controlo de potência ativa e reativa, e logo do fator de potência, bem como da tensão produzidas.

Este tipo de geradores revelam a capacidade de controlo de tensão e potência reativa gerada através da excitação, o que é impossível nos geradores assíncronos, uma vez que estes necessitam da absorção de energia reativa da rede o que, para além da extrema dependência desta, apresentam problemas ao nível do controlo de tensão e de frequência. Podemos observar na figura 3.24 as diferentes topologias para este tipo de geradores:

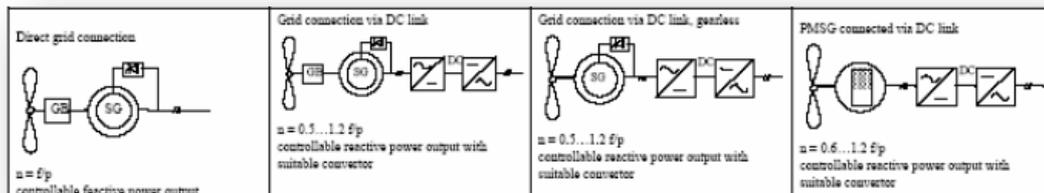


Figura 3.24: Diferentes soluções em geradores síncronos. [48]

A principal vantagem dos geradores síncronos prende-se com o facto de que estes apresentam um elevado rendimento e podem ser diretamente ligados à rede elétrica, evitando a injeção de harmónicos de corrente, revelando-se bastante robustos e adequados ao uso de turbinas eólicas de grandes potências.

De modo a que esta opere a uma velocidade variável, são necessários conversores, o que resulta numa desvantagem, uma vez que o custo final do produto é incrementado, e este fica suscetível de introduzir harmónicos de corrente, reduzindo a qualidade da energia elétrica produzida. Os geradores síncronos com excitação convencional produzem a maior parte de energia elétrica do mundo.

No caso de máquinas síncronas com uma excitação por ímanes permanentes, sob certas condições ainda é possível injetar energia reativa na rede. Podem ser utilizados conversores AC/DC/AC ou AC/AC, sem multiplicador de velocidade nem circuito de excitação para a máquina síncrona.

A principal característica das máquinas síncronas convencionais é a facilidade de controlo de tensão e fator de potência, no entanto, nas máquinas de ímanes permanentes existem limitações a este nível. Devido a estas, este tipo de geradores não são utilizados em centrais de elevada potência, embora ao nível da pequena e média potência, recorrendo à eletrónica de potência, consigam revelar resultados bastante proveitosos, consistindo numa boa aposta neste tipo de geração de energia.

Ao longo do tempo foram efetuadas tentativas na variação da espessura do entreferro e disposição magnética dos ímanes. Esta limitação torna difícil também a integração dos geradores de ímanes permanentes em grandes centrais hidroelétricas.

Nos sistemas em que o rotor é constituído por ímanes permanentes, e o número de polos é adequado, evita-se o uso da caixa de velocidades, assim como, obviamente, não existe um circuito elétrico indutor de excitação, uma vez que a excitação do rotor é realizada pelos próprios ímanes permanentes. Este tipo de gerador consegue operar a uma velocidade variável e utiliza um sistema de conversão de modo a conseguir corrigir a frequência do sinal gerado e fornecer energia reativa.

Este tipo de sistema é ainda pouco utilizado para elevadas potências devido a custos elevados, sendo bastante utilizados em sistemas com baixa potência.

As máquinas síncronas de ímanes permanentes modernas apresentam características que a tornam competitivas com máquinas síncronas convencionais e com as máquinas assíncronas. Para além das vantagens relativas à sua construção física, a cada vez maior oferta de materiais magnéticos com elevados produtos energéticos e de sistemas de controlo baseados em eletrónica de potência, com custos acessíveis, desenvolveram a resposta aos problemas por parte desta máquina a campos com exigentes características, tornando assim esta solução numa alternativa viável não só na energia eólica, mas também na produção de outras energias renováveis com recurso ao uso da conversão eletromecânica. Esta máquina apresenta elevados rendimentos, flexibilidade de tamanho, elevada robustez e fiabilidade, levando a uma baixa manutenção.

Efetuada uma análise sobre as vantagens e desvantagens de cada tipo de gerador, e segundo uma pesquisa ao nível dos fabricantes, os geradores mais utilizados atualmente para a conversão de energia eólica, são: gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo com velocidade variável, o gerador síncrono de rotor bobinado sem caixa de velocidades e o gerador de indução duplamente alimentado. Abaixo está uma figura 3.25 que ilustra os pontos fortes e fracos de cada um:

		<i>GIGE</i>	<i>GIDA</i>	<i>GSRB</i>
Custo, Tamanho e Peso		+	+/-	-
Adaptação à rede de 50 Hz e 60 Hz		-	-	+
Ruído		-	+	+
Rendimento energético	Varição de velocidade	-	+	+
	Caixa de velocidades	-	-	+
	Gerador	+	+	-
	Conversores	+	+/-	-
Fiabilidade e manutenção	Escovas	+	-	- (PM: +)
	Caixa de velocidades	-	-	+
	Cargas mecânicas	-	+	+
	Complexidade	+	-	-
Qualidade da potência	<i>Flicker</i>	-	+	-
	Controlo de tensão	-	+	+
	Harmónicos	+	-	-
Falhas da rede	Falhas de corrente	+	+	+/-
	Colocação em serviço	-	+	+

Figura 3.25: Comparação da diferente tecnologia eólica. [31]

A utilização de geradores síncronos controlados por tensão induz à existência de um melhor desempenho da rede e permite que a capacidade máxima permissível de geração distribuída seja mais elevada. Porém, caso seja de interesse do governo e/ou concessionárias, as penalidades impostas a este tipo de geradores durante operação indutiva devem ser eliminadas.

Os geradores de indução mostram-se interessantes no caso de redes com restrições da capacidade de curto-circuito, visto tais máquinas não fornecerem correntes de falta de forma sustentada, porém, permitindo a detecção de falta usando relés de sub/sobre tensão.

No caso da existência de afundamentos de tensão, verifica-se que o uso de geradores síncronos com tensão constante pode melhorar o desempenho da resposta de tensão do barramento em que o gerador é instalado. De maneira geral, o uso de geradores síncronos com fator de potência constante não é a pior opção do ponto de vista do desempenho global do sistema. [50]

As visíveis vantagens apresentadas pelo gerador de indução com o rotor em gaiola de esquilo não são suficientes para que este seja competitivo na produção de energia eólica, preferindo-se o de rotor bobinado com dupla alimentação, sendo o gerador síncrono de ímãs permanentes ainda mais vantajoso que este pois não possui escovas na sua constituição. Um comparativo entre as diversas topologias de máquinas de ímãs permanentes, revela que a solução adequada são as máquinas de ímãs permanentes com fluxo axial. Como é visto, os geradores de ímãs permanentes apresentam enormes vantagens de utilização neste tipo de aproveitamento. A redução do valor das suas perdas comparativamente com os geradores convencionais, os atuais materiais magnéticos de alto produto energético, baratos, o seu elevado rendimento e robustez permitem corroborar a preferência pela escolha dos geradores de indução neste tipo de aproveitamentos.

3.3.4 - A escolha do gerador na energia hídrica

3.3.4.1 - Rios/Lagos

A escolha de um gerador a implementar suscita receios e inseguranças mediante as características específicas do mesmo e da turbina, uma vez que este grupo deverá funcionar em perfeita simbiose e apresentar um bom rendimento, uma boa velocidade nominal de funcionamento, etc.

Nas centrais que exigem uma potência mais elevada, albufeiras por exemplo, os aspetos económicos não são tão relevantes, pelo que o gerador síncrono é o conversor eletromecânico usualmente eleito. A opção pela exclusividade de utilização do gerador síncrono em grandes aproveitamentos deve-se à necessidade deste fornecer energia reativa à instalação em que o gerador está interligado, corrigindo o fator de potência, à potência do gerador ser elevada (superior a 5MVA, existindo atualmente bastante interesse pelo gerador de indução para potências superiores a 100 MVA), e à regulação de tensão, que permite um funcionamento com carga variável mas com tensão constante. No entanto é a natureza dos caudais, velocidades e quedas que também ditam a melhor opção de escolha do conversor eletromecânico.

Nas instalações com potência inferior, o conversor eleito é o gerador assíncrono, uma vez que este apresenta uma elevada robustez e é economicamente viável.

O gerador assíncrono é a solução mais utilizada devido às suas características únicas de robustez, fiabilidade e preço. O gerador de indução tem algumas vantagens devido à sua simplicidade de operação, robustez, proteção natural contra curto-circuitos e o seu baixo custo, se comparado com os geradores síncronos. Além disso, este não necessita de ser sincronizado com a rede.

Perante transitórios de binário, o gerador assíncrono dispõe de amortecimento mecânico resultante do efeito provocado pela diferença de velocidades do rotor e do campo girante do estator (escorregamento).

Em estudos de mini hídricas, considera-se a central geradora ligada a uma rede infinita e que não pode funcionar em modo isolado. [51]

Em Portugal, as centrais com potência mais baixa estão muitas vezes equipadas com geradores síncronos, o que contraria o citado.

Existem várias razões para tal ocorrer, uma das quais reside no facto de que, quando este tipo de central se começou a espalhar pelo continente Português, não existiam garantias de fiabilidade no funcionamento de operação de máquinas assíncronas como gerador, levando a que se optasse por uma estratégia resguardadora e segura, para evitar problemas no funcionamento. Outra razão tem a ver com o modo de operação das turbinas.

Em quedas baixas, a velocidade da mini-hídrica também é baixa. Os fabricantes de motores de indução não ofereciam soluções equipadas com multi-pólos, porque não tinham aplicação na indústria. Nestas condições, o uso deste tipo de conversor obrigava a recorrer a uma caixa de engrenagens para adaptação de velocidades. Sem qualquer relação com o tipo construtivo, o custo dos geradores aumenta sensivelmente com o número de pólos, ou seja, diminui com o aumento da velocidade nominal.

Daí a vantagem económica associada ao uso de multiplicadores de velocidade e geradores de indução. Contudo, este conjunto também apresentava inconvenientes, como: redução do rendimento e, conseqüentemente, da energia produzida, mais manutenção, menos fiabilidade, construção especial para proteção contra embalamento. Tudo visto e ponderado, levou os projetistas a escolher a solução habitual em aproveitamentos hidroelétricos, constituída por grupos turbina/alternador, que dispensam a caixas de velocidades. [52]

O fator de potência durante os períodos de ponta não deverá ser menor que o valor de 0,85 indutivo, nos geradores assíncronos, sendo instaladas as baterias de condensadores necessárias. Em relação aos geradores síncronos, o fator de potência deste deverá ser mantido entre o valor de 0,8 indutivo e 0,8 capacitivo.

Ao contrário de grandes aproveitamentos do tipo albufeira, existem mini-hídricas situadas em zonas de baixa queda e grande caudal, onde se exige a presença de turbinas normalizadas com bons rendimentos para uma larga gama de regime de funcionamento.

Em regra geral utilizam-se geradores de indução neste tipo de aproveitamentos, ou seja, numa central do tipo “fio-de-água”, isto porque estes apresentam uma elevada consistência física e requerem uma menor manutenção. Contudo, os geradores de ímanes permanentes respondem também aos pedidos exigidos para o funcionamento desta central. A sua elevada robustez, pequeno tamanho e rendimento elevado, elevada fiabilidade e conseqüente baixa manutenção, permite uma utilização vantajosa em aproveitamentos de pequena potência.

Esta máquina apresenta elevados rendimentos, flexibilidade de tamanho, elevada robustez e fiabilidade, levando a uma baixa manutenção e permite que a operação seja contínua.

Os geradores de ímanes permanentes podem ser operados a diferentes velocidades sendo que este fator interfere na sua construção mediante a finalidade de utilização.

O preço de um gerador de ímanes permanentes é inversamente proporcional ao regime de rotação deste. À medida que avançamos na redução da velocidade, mas querendo manter a potência fixa, verifica-se um aumento de preços, e o gerador apresenta um tamanho maior. Este fenómeno acontece porque a redução da velocidade implicará um maior desgaste do material do dispositivo, uma vez que não é pretendida uma redução do nível de potência. É necessário aumentar o diâmetro e comprimento das pás, assim como é necessário mais cobre e ímanes. A estrutura do gerador fornece uma boa estabilidade e uma maior eficiência.

Os geradores estão diretamente acoplados à turbina hidráulica e a velocidade de rotação é coordenada em cada momento para o ângulo de ataque das pás do impulsor. Portanto, a eficiência da turbina continua a ser muito elevada em todos os aproveitamentos hidroelétricos e até de marés.

3.3.4.2 - Marés, Ondas e Correntes

Dependendo do sistema de conversão, é necessário utilizarem-se geradores com funcionamento a velocidade variável. Com isto, são identificados os seguintes tipos: Gerador de indução duplamente alimentado, gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo, gerador síncrono convencional e geradores síncronos de ímanes permanentes.

Existem semelhanças entre estas aplicações com as tecnologias maduras atualmente utilizadas em turbinas eólicas. Os geradores favoritos na produção de energia eólica (gerador indução duplamente alimentado com caixa de velocidades e transmissão direta de baixa velocidade, e gerador síncrono convencional com eletrónica de potência), são os possíveis candidatos para o uso em sistemas de conversão de energia de ondas e coluna de ar oscilante.

Conclui-se que gerador síncrono é a opção favorita devido ao seu rendimento energético, peso e controlo, apesar de exigir a existência de um conversor de frequência entre o gerador e a rede.

A desvantagem significativa do gerador de indução duplamente alimentado é a sua necessidade de manutenção, uma vez que este apresenta escovas na sua constituição. As máquinas de indução não são adequadas neste tipo de aproveitamento devido à baixa velocidade das turbinas dos sistemas conversão de energia de ondas.

A possibilidade de utilização destes geradores foi bastante investigada, no entanto conclui-se que, em aproveitamentos deste tipo, estas máquinas revelam-se bastante pesadas, ineficientes e dispendiosas.

A necessidade de reduzir a manutenção, uma vez que esta por vezes é de difícil acesso devido à localização oceânica, implica que o uso de geradores não envolva escovas na sua constituição. Os geradores de ímanes permanentes encontram-se assim em foco.

O desenvolvimento de geradores de ímanes permanentes de alta densidade de energia, tais como neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B), podem apresentar elevados rendimentos elétricos.

Existem as seguintes principais topologias destes geradores possíveis de serem utilizadas:

- Geradores de ímanes permanentes de fluxo longitudinal;
- Geradores de ímanes permanentes de relutância variável; (geradores de ímanes permanentes com fluxo transversal como subconjunto destas);
- Geradores de ímanes permanentes de fluxo axial.

Após estudos verificou-se que a máquina de ímanes permanentes relutância variável é a que melhor potencial apresenta para sistemas de conversão de energia de ondas, uma vez que apresenta maior densidade de potência e eficácia em comparação com a máquina com a disposição do fluxo longitudinal, apesar da tensão de cisalhamento elevada oferecida pela máquina com fluxo transversal (até 200kN/m²). [53]

A tecnologia utilizada nos diferentes aproveitamentos está representada na seguinte tabela:

Tabela 3.1: Diferentes geradores utilizados nos diversos aproveitamentos. [54]

Dispositivo	Tecnologia Extração	Gerador	Velocidade Operação
Central LIMPET	CAO e turbina de Wells	Máquina de Indução	Variável
Central Pico	CAO e turbina de velocidade variável	Máquina de Indução duplamente alimentada	Variável
Pelamis	Sistema de armazenamento hidráulico	Máquina de Indução	Fixa
Wave Dragon	Galgamento e turbina hídrica	Máquina síncrona de ímanes permanentes	Variável
AWS	Ação direta das ondas no gerador	Máquina linear de ímanes permanentes	Variável

A solução mais utilizada são os ímanes permanentes para o aproveitamento da energia das ondas, substituindo inúmeras vezes às máquinas standard refletindo-se em vantagens noutros campos, devido às seguintes razões:

- Capacidade de resposta a baixas velocidades e não depende de ligação à rede uma vez que a sua excitação é permanente;
- Inexistência de anéis e escovas, implicando menor manutenção;
- Dimensão e peso igual ou inferior às máquinas síncronas convencionais.

3.3.4.3 - Biomassa e outros

A produção de biomassa está associada inúmeras vezes à produção combinada de calor e energia a partir da queima de matéria orgânica. Esta apresenta diversas aplicações térmicas, tais como a produção de calor e água quente sanitária, sendo os consumos térmicos de

determinadas indústrias muitas vezes abastecidos por caldeiras acionadas pela queima de resíduos.

O método de funcionamento envolve a produção de vapor, passando os gases de combustão quentes provenientes da queima, através de uma caldeira de vapor de aquecimento dos resíduos. Este vapor é então usado para acionar um motor a vapor ou gerador de turbina, como já foi dito.

A geração de pequena escala, utilizando o vapor da combustão da biomassa, é bastante cara. Para aplicações de pequena escala com base em biomassa sólida, a geração de energia termoelétrica revela-se ser uma tecnologia promissora, uma vez que permite uma conversão direta de calor em energia elétrica, surgindo um novo tipo de produção descentralizada em pequena e microescala, chamada cogeração e onde os geradores de ímanes permanentes apresentam uma presença relevante.

A cogeração equipa muitas das vezes centrais deste tipo e classificam-se conforme o tipo de máquina térmica que a equipa, motores de explosão - ciclo de Otto, de compressão interna - Diesel, turbinas a gás ou a vapor e numa escala mais recente, microturbinas.

As centrais de biomassa utilizam caldeiras a vapor (ciclo Rankine) para gerarem eletricidade, sendo que a energia mecânica que advém desse processo é utilizada de modo a acionar um gerador elétrico. Nas centrais que utilizam ciclo combinado de calor e eletricidade, a variante mais comum é quando a eletricidade é gerada inicialmente e o calor é aproveitado a partir dos gases de exaustão.

Uma vez que a biomassa possui um baixo poder calorífico devido à sua elevada percentagem de humidade, a produção de eletricidade necessita de sistemas mais complexos, tais como grandes centrais térmicas. Os geradores de ímanes permanentes irão atuar ao nível das microturbinas existentes para a conversão de energia mecânica em calor. Estas, comparadas com as turbinas convencionais apresentam potências mais reduzidas (normalmente até 200kW), um ciclo de combustão simplificado e um eixo do rotor com pequenas dimensões.

O funcionamento baseia-se na parte de energia gerada pela turbina que é utilizada para movimentar o compressor, uma vez que ambos estão conectados no mesmo veio. Esta necessita de um gerador que produza elevadas velocidades, sendo que a utilização de geradores síncronos de ímanes permanentes é bastante elevada. [31]

A energia geotérmica é um aproveitamento que aproveita o calor proveniente da terra para mover um gerador instalado numa central. Os geradores síncronos de ímanes permanentes revelam-se vantajosos nestes casos, pois operam a pequenas potências, possuem flexibilidade de construção e possuem pouca necessidade de manutenção.

Contudo, existem outras soluções normalmente utilizadas onde uma turbina é conectada ao gerador mediante uma caixa de velocidades e numa das extremidades está um gerador a gás no qual a turbina movimenta o compressor. Esta solução revela-se desvantajosa, uma vez que a fiabilidade diminuirá e o tamanho da microturbina aumentará.

3.4 - Conclusão

Os geradores síncronos de ímanes permanentes apresentam cada vez mais uma maior aplicação em sistemas de conversão de energia elétrica devido a vantagens que apresentam face a tecnologias tradicionais. São usados em números crescentes na cogeração e, recentemente, também em mini-hídricas, sendo uma solução com bastante potencial na energia eólica. Estes geradores apresentam manutenção reduzida e, maior confiabilidade.

As vantagens que possuem passam pelo aumento da eficiência e uma solução construtiva mais compacta, sem caixa de velocidade e capacidade de operação a diversas velocidades. Não são necessárias escovas ou contactos deslizantes.

Tudo isso resulta em baixas necessidades de manutenção, o que, especialmente para parques eólicos offshore e em casos como a energia maremotriz será um elemento de essencial vantagem. Existe assim um crescente uso nas energias renováveis com perspectivas de evolução e domínio do mercado devido às suas características.

Capítulo 4

Geradores de Ímanes Permanentes

4.1 - Introdução

O contexto energético e ambiental dentro do qual o mundo se encontra leva à constante procura por uma otimização da eficiência energética, incentivando a investigação de novas soluções nas máquinas elétricas, aperfeiçoando-as, para reduzir custos e melhorar o rendimento das mesmas uma vez que estas são responsáveis por grande parte de produção e consumo mundial.

A maioria da energia elétrica é produzida através de máquinas síncronas convencionais, operando como geradores. Este tipo de máquinas apresenta uma forte aplicação na produção de energia a partir de fontes renováveis. Os geradores síncronos permitem uma boa absorção de energia reativa da rede, uma vez que possuem um regulador de tensão, mantendo a tensão constante no seu valor nominal à medida que se varia a corrente de excitação.

A descoberta e o aperfeiçoamento de diferentes características de materiais magnéticos e a utilização de semicondutores de comutação forçada, controlando certas características, permitiram que as máquinas de ímanes permanentes concorressem com as máquinas síncronas convencionais sendo uma alternativa em situações de crescente importância.

Este tipo de máquinas são competitivas também com as máquinas de indução, tendo sido o seu uso cada vez maior em aproveitamentos de produção de energia a baixa potência.

Devido à utilização cada vez maior de recursos renováveis e à procura por soluções técnicas mais económicas e eficientes, surge a necessidade de se desenvolverem sistemas de conversão eficientes, nos quais os geradores de ímanes permanentes apresentam características promissoras.

Quando comparamos a máquina síncrona de ímanes permanentes com uma máquina de indução, podemos concluir que o aspeto construtivo da máquina de indução revela um investimento mais reduzido, no entanto a máquina de ímanes permanentes apresenta rendimento e fator de potência mais altos, o que torna um investimento rentável a longo prazo. Em relação às máquinas síncronas convencionais, o aspeto significativo é a inexistência de enrolamento de excitação rotórico, com economia ao nível das correspondentes perdas.

4.2 - Aspectos particulares que valorizam o Gerador de Ímanes Permanentes

A constante evolução no domínio de novos materiais magnéticos foram uma causa do desenvolvimento e constante estudo de geradores de ímanes permanentes. Com os recentes materiais utilizados, à base de terras raras, entre os quais se destacam os de neodímio-ferro-boro, conseguiu-se originar fluxos de excitação com grande coercividade, através de ímanes de pequena espessura e de alta densidade. Deste modo, no seu projeto e construção, surgem assim aspectos particulares que valorizam os geradores de ímanes permanentes, podendo-se destacar:

- A eliminação de anéis e escovas de contato, levando à existência de uma maior fiabilidade, maior rendimento e menores custos de manutenção;
- Eliminação das perdas no enrolamento de excitação do rotor, visto que não existem enrolamentos condutores por ser constituída por ímanes permanentes. Assim, as perdas Joule localizam-se totalmente no enrolamento estatórico;
- Devido às perdas serem reduzidas, o rendimento da máquina é incrementado, podendo reduzir por consequência, o tamanho desta, oferecendo uma solução com um peso e volume menor que a máquina síncrona convencional e alargando o leque de utilização a aplicações aeroespaciais e ao ramo automóvel;
- Existe a possibilidade da criação de um arranjo de disposição dos ímanes, alterando a sua característica de funcionamento;
- Os limites associados às potências disponíveis resultam de considerações económicas e não de limites associados aos ímanes.

A introdução de ímanes de terras raras aumentou o leque de potências disponível, devido ao seu baixo custo.

Infelizmente, as características mecânicas da maior parte dos materiais magnéticos duros são consideravelmente inferiores às dos materiais magnéticos macios e condutores utilizados nos sistemas de excitação elétrica convencionais. Daqui resulta que as características mecânicas impõem uma limitação na potência, sendo necessário recorrer a componentes estruturais que assegurem uma resistência mecânica adequada no projeto da máquina. [55]

A utilização deste tipo de máquina pode estender-se a sistemas que necessitem de uma operação a velocidade variável, sendo exigida à máquina que opere pelo mesmo princípio de funcionamento dos convencionais.

Uma importante característica das máquinas síncronas convencionais é a facilidade de controlo de características externas como a tensão e o fator de potência. Estes parâmetros não podem ser controlados diretamente na geração através de máquinas com ímanes permanentes, no entanto verificou-se que variando a espessura do entreferro e através da disposição magnética dos ímanes, se conseguem alguns resultados relativos a este controlo de características.

A utilização da máquina síncrona de ímanes permanentes é vasta, implicando que se proceda ao cumprimento de regras e das condições necessárias à legal e correta instalação, tendo as pesquisas de desenvolvimento destas máquinas procurado atender as seguintes características:

- Elevada densidade de fluxo no entreferro;
- Elevada razão potência / peso;
- Elevada razão binário / inércia;
- Reduzida oscilação do binário;
- Elevada eficiência;
- Projeto compacto. [56]

Destaca-se assim a aplicação da máquina nos seguintes campos:

- Robótica - A máquina permite o controlo de velocidade e do binário com precisão e emite níveis reduzidos de ruído, apresentando flexibilidade na geometria e redução do peso e volume;
- Indústria automóvel- grande utilizadora de máquinas de ímanes permanentes;
- Indústria têxtil, papel e vidro - É importante que as máquinas girem a uma velocidade constante, sendo esta imposta pela frequência da rede, oferecendo vantagem sobre as máquinas assíncronas;
- Aplicações militares e aeroespaciais - Funcionam maioritariamente como unidades de potência auxiliares devido às reduzidas dimensões que assumem;
- Energias Renováveis - Podem operar como gerador isolado e ligadas à rede. A maior utilização é sobretudo na produção de energia eólica, permitindo eliminar a caixa de velocidades, reduzindo peso, ruído e aumento de rendimento e fiabilidade do sistema. [57]

Uma aplicação cada vez mais importante deste tipo de máquinas reside pois na conversão de energias renováveis em energia elétrica. Comparativamente às máquinas assíncronas, estes permitem a exploração dos recursos renováveis com fatores de potência mais elevados, e em relação aos geradores síncronos convencionais, os geradores de ímanes permanentes são uma solução mais eficaz em termos de robustez e fiabilidade, e, pela eliminação das perdas Joule no rotor, os rendimentos destes assumem valores mais elevados.

4.3 - Constituição e variantes construtivas

As máquinas síncronas de ímanes permanentes são máquinas elétricas bastante semelhantes às máquinas convencionais onde os enrolamentos do rotor são substituídos por ímanes permanentes com alta eficiência energética.

Numa máquina síncrona convencional, os enrolamentos do rotor são alimentados por corrente contínua com a finalidade de se conseguir produzir um campo magnético contínuo, enquanto na máquina de ímanes permanentes, o mesmo efeito é conseguido com os ímanes.

Estes produzem fluxo naturalmente, sem necessidade de uma fonte de excitação externa, como no caso das bobinas do rotor bobinado. O valor do fluxo fornecido por estes ímanes não pode ser controlado por um agente externo, ao contrário do que acontece nas máquinas síncronas de rotor bobinado, onde o fluxo é controlado atuando-se sobre o valor da corrente contínua que excita as bobinas dos polos. [58]

Ao contrário da máquina síncrona convencional, a máquina de ímanes permanentes não possui escovas nem exige uma fonte de tensão contínua, o que leva à existência de um menor número de manutenções e rendimento mais elevado. Os ímanes são colocados normalmente tangencialmente à superfície dos polos do rotor, ou embutidos neste.

Assim, em relação à máquina síncrona de rotor bobinado, a máquina síncrona de ímanes permanentes apresenta as seguintes desvantagens:

- Não permite controlo do fluxo;
- Não permite controlo da potência reativa.

No entanto, o facto de não haver necessidade de presença de um circuito de excitação externo é uma vantagem importante da máquina síncrona de ímanes permanentes. As vantagens da máquina síncrona de ímanes permanentes face à máquina síncrona convencional são:

- Ausência de sistema de excitação;
- Menores perdas Joule, pois não há densidade de corrente nem condutores no rotor;
- Menor necessidade de manutenção, essencialmente devido à inexistência de contactos deslizantes;
- Melhor relação potência/volume, sendo mais compacta e robusta em relação à máquina síncrona de rotor bobinado.

Relativamente a custos, é uma questão delicada, uma vez que este fator envolve o tipo de aplicação que os geradores de ímanes permanentes terão, a sua faixa de potência, materiais e sua importação, entre outros.

4.3.1 - Estator

O estator de um motor síncrono de ímanes permanentes é semelhante ao estator das máquinas síncronas e assíncronas. É no seu rotor que se encontra a diferença construtiva peculiar desta máquina.

O seu estator é constituído por chapas de ferro e silício compactadas, e por ranhuras, onde os enrolamentos são embutidos. Estas ranhuras provocam variações periódicas na forma de onda da indução magnética no entreferro, dando origem ao surgimento de harmónicos que irão alterar a força eletromotriz induzida. Os harmónicos provocarão ruído e alteram a precisão de controlo do gerador. Uma solução para reduzir este efeito consiste em inclinar os

ímãs de forma a reduzir as variações da força eletromotriz induzida. No entanto, este método de inclinação de ímãs reduz o valor eficaz da tensão produzida.



Figura 4.1: Configuração de um rotor com os ímãs permanentes inclinados. [57]

Outra configuração estatórica possível consiste na disposição dos enrolamentos do estator sem estes estarem embutidos em ranhuras, no entanto, esta configuração é mais aconselhada e utilizada em aplicações que exigem uma velocidade elevada, justificada pela redução do seu peso. Como vantagem consequente desta configuração, as perdas no ferro estatóricas são reduzidas, isto porque é eliminado volume de ferro associado aos dentes. Os harmónicos que resultam da força eletromotriz são inferiores devido à ausência de ranhuras, uma vez que o fluxo magnético originado pelos ímãs permanentes não encontra um circuito magnético anisotrópico durante o movimento de rotação. A presença de ranhuras irá provocar binários parasitas, o que resulta num aumento de vibração e ruído da máquina. Verifica-se que utilizando esta configuração, com ou sem núcleo de ferro, o fluxo atravessa a região dos condutores caso não exista outro percurso de baixa relutância, originando elevados níveis de correntes de Foucault nos condutores, quando comparado com a configuração de um estator com ranhuras em que existe um percurso alternativo de baixa relutância.

Existe necessidade de utilizar ímãs com elevadas induções remanentes. Apesar das perdas devido às correntes de Foucault nos condutores, existem as seguintes vantagens na utilização de um estator sem ranhuras:

- Redução no peso da máquina;
- Redução de binários externos;
- Redução da distorção na forma de onda da força eletromotriz;
- Torna-se desnecessária a construção de rotores com ímãs inclinados;
- Não se verifica saturação, perdas no ferro e vibrações no estator;
- O efeito dos campos desmagnetizantes sobre os ímãs devido ao aumento da espessura do entreferro é reduzido;
- Redução da reatância de fugas do estator. [57]

4.3.2 - Entreferro

O entreferro situa-se entre o estator e o rotor e é um parâmetro fundamental em qualquer máquina rotativa. Nas máquinas síncronas de ímãs permanentes, o entreferro é

bastante importante pois o seu comprimento radial determina o ponto de funcionamento dos ímanes. O projeto da máquina é influenciado pelas dimensões do entreferro. Desta forma, se a sua espessura aumenta, as tolerâncias das superfícies do estator e do rotor são menos exigentes, o que leva à existência de menores despesas na construção da máquina. Os entreferros com comprimento maior exigem a implementação de ímanes permanentes com campos coercitivos mais elevados, reduzindo a indução magnética no funcionamento destes.

4.3.3 - Rotor

O rotor de uma máquina síncrona de ímanes permanentes é dotado de ímanes, ao contrário das máquinas síncronas convencionais, como referido atrás.

Existem diversas disposições dos ímanes no rotor com vista à otimização do rendimento e redução de perdas da máquina. A presença dos ímanes permanentes no rotor origina a presença de um circuito magnético anisotrópico, sendo mais elevada a relutância nos percursos do fluxo segundo o eixo direto.

Comparativamente à máquina síncrona convencional, estas máquinas apresentam pois anisotropia inversa, exceto no caso de os ímanes se situarem na superfície do rotor.

As várias disposições construtivas de acordo com a orientação dos ímanes, tendo por base a redução do peso e/ou do custo do rotor, a maximização da indução magnética no entreferro e a minimização do fluxo de fugas entre os ímanes, são descritas a seguir e podem ser:

- Topologia Circunferencial;
- Topologia Radial;
- Topologia com ímanes embutidos (Interior);
- Topologia com ímanes na superfície do rotor (Periférica);
- Pinça ou garra polar.

4.3.3.1 - Topologia de Fluxo Radial

Na topologia de fluxo radial é possível obterem-se níveis de densidades de fluxo no entreferro superiores à dos próprios ímanes, sendo assim uma configuração indicada para máquinas que possuem ímanes de baixa indução. Uma vez que esta configuração leva à existência de elevados fluxos de dispersão, é necessário recorrer-se a um eixo de material não magnético para suporte estrutural, no entanto, a presença desse eixo incrementará o custo da máquina. Revela-se uma configuração vantajosa para máquinas com um número elevado de pares de polos, ou seja, velocidades de rotação baixas. [57]

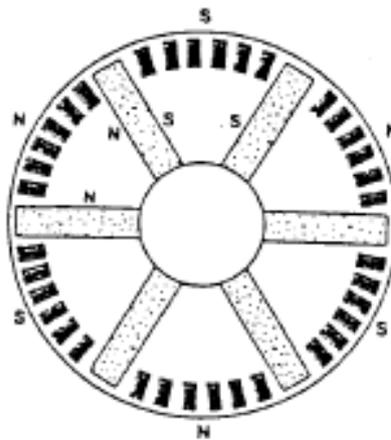


Figura 4.2: Configuração rotórica circunferencial. [57]

4.3.3.2 - Topologia Radial

A topologia radial de uma máquina síncrona de ímãs permanentes produz um fluxo apontado diretamente para o entreferro. Com a máquina em vazio, a densidade de fluxo útil no entreferro é inferior à densidade nos ímãs devido à dispersão do fluxo no rotor, sendo necessário utilizar um isolamento magnético (barreiras de fluxo) nas proximidades da superfície do rotor de modo a reduzir a dispersão de fluxo entre os polos adjacentes e maximizar o fluxo que atravessa o entreferro, como por exemplo, o alumínio. As ranhuras do rotor onde se encontram alojados os ímãs estão ligadas na superfície rotórica, tendo em vista a formação de peças laminadas inteiras, oferecendo à máquina uma boa sustentação mecânica. Existe uma desvantagem nesta estrutura que tem a ver com as pontes, pois estas oferecem um caminho preferencial para o fluxo, levando facilmente à saturação. A redução da largura das pontes aumenta o fluxo no entreferro, mas torna a construção rotórica extremamente frágil, nomeadamente quando a máquina é utilizada em aplicações que exigem uma velocidade elevada. [57]

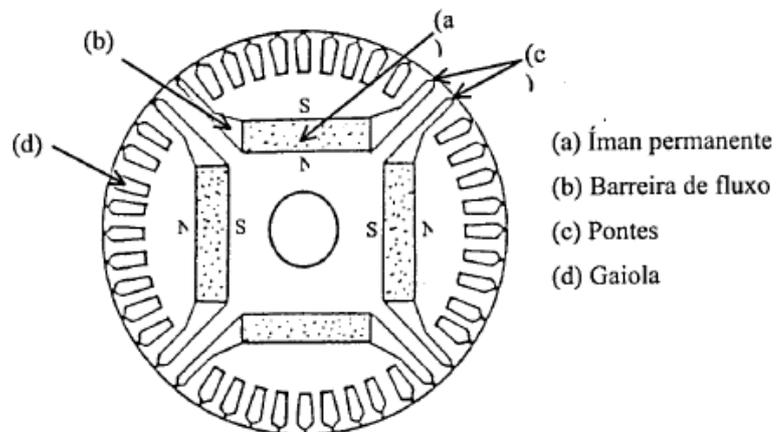


Figura 4.3: Configuração rotórica radial. [57]

4.3.3.3 - Topologia com ímanes embutidos (Interior)

A topologia com ímanes embutidos utiliza-se em máquinas com um reduzido número de pares de pólos para velocidades elevadas de funcionamento. Existe uma diferença de relutância elevada nesta configuração, uma vez que o fluxo criado pelos ímanes deve atravessar uma elevada quantidade de chapas rotóricas. Esta tecnologia apresenta um custo mais elevado em relação à topologia com ímanes na superfície. [57]

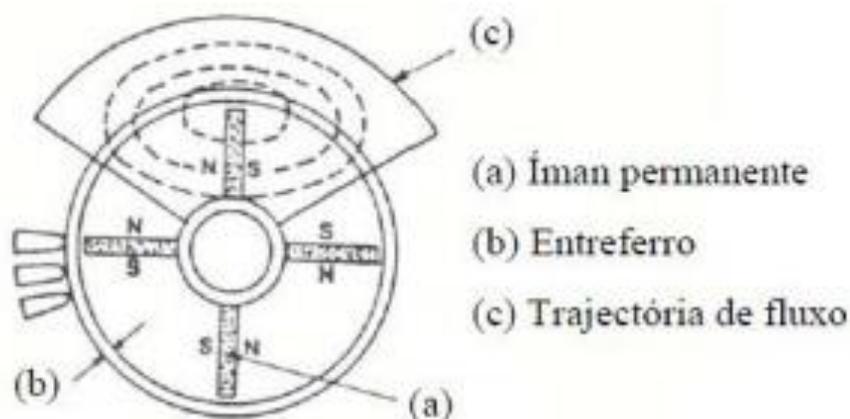


Figura 4.4: Configuração rotórica interior. [57]

4.3.3.4 - Topologia com ímanes na superfície do rotor (Periférica)

A topologia com ímanes na superfície do rotor, ou topologia periférica, apresenta um baixo momento de inércia e uma anisotropia magnética praticamente nula. A inclusão de uma gaiola de esquilo e ímanes permanentes permite que a máquina possua um arranque assíncrono, quando motor. Elevadas velocidades de funcionamento perante esta topologia podem fazer com que os ímanes permanentes se soltem. [57]

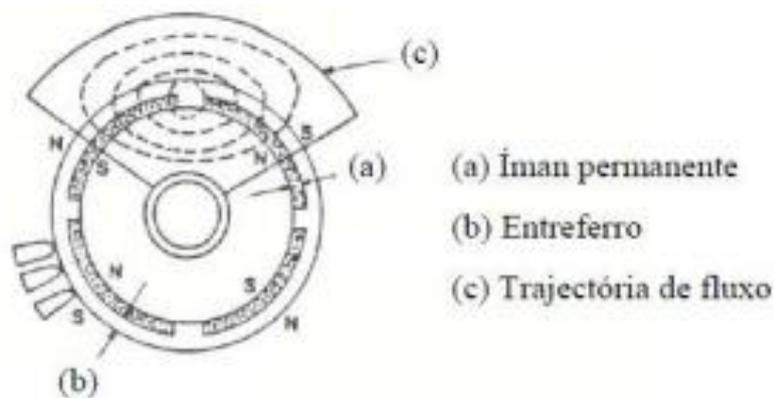


Figura 4.5: Configuração rotórica periférica. [57]

4.3.3.5 - Disposição em pinça (garra polar)

Este tipo de configuração utiliza ímanes magnetizados axialmente, sendo que as partes de aço nas extremidades do íman são colocadas de forma a que as garras sejam intercaladas em toda a superfície do íman de forma a criar polos norte e sul alternados. Esta topologia utiliza uma peça magnética de alnico. Utiliza-se esta configuração em máquinas com um elevado número de polos, no entanto esta aplicação está a cair em desuso devido à dificuldade de conduzir o fluxo axial radialmente através do entreferro. [57]

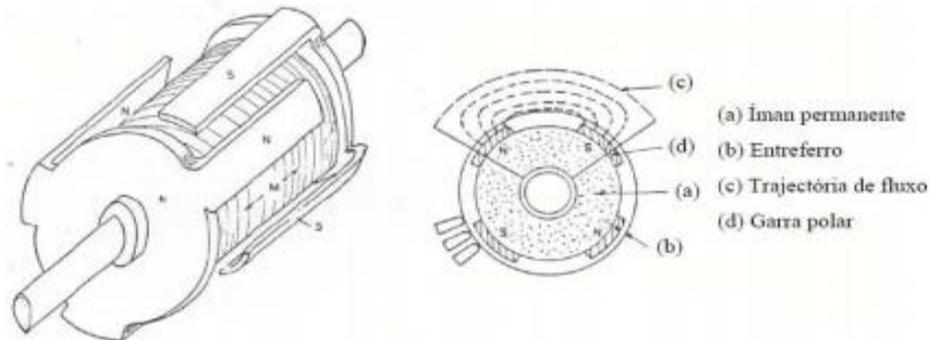


Figura 4.6: Configuração rotórica em pinça. [57]

4.3.4 - Os ímanes permanentes

Os materiais magnéticos são caracterizados e comparados em termos das propriedades obtidas a partir da sua curva de histerese, podendo classificar-se em duros ou macios.

Os primeiros caracterizam-se por apresentarem uma baixa permeabilidade magnética, situando-se os ímanes permanentes neste grupo, enquanto que os segundos apresentam uma elevada permeabilidade magnética, pois o circuito oferece uma baixa relutância ao movimento do fluxo magnético.

Um dos problemas do uso de ímanes permanentes em máquinas elétricas é a possibilidade de surgirem correntes capazes de desmagnetizar os ímanes, por exemplo, em um eventual curto-circuito. Para minimizar este problema, estes devem apresentar um elevado campo coercitivo.

Os ímanes permanentes são já uma parte da tecnologia moderna, sendo cada vez mais utilizados no quotidiano. As propriedades desejadas de um íman permanente são tipicamente definidas ao nível da remanência (B_r) e do campo coercivo (H_c) dos materiais magnéticos. A sua curva de desmagnetização é um parâmetro bastante importante, uma vez que determina informações acerca de características de funcionamento.

Um bom íman permanente deve possuir uma baixa massa e produzir um elevado fluxo magnético, para além de que deve ser estável perante ações externas que possam desmagnetizá-los.

Deste modo, a energia que um íman permanente é capaz de fornecer a um certo circuito externo é um fator preponderante na comparação dos diversos materiais magnéticos. As características de saída da máquina podem ser melhoradas com recurso a materiais magnéticos permanentes com produtos energéticos elevados.

Na figura abaixo representada são descritos materiais utilizados nos ímãs permanentes e suas características:

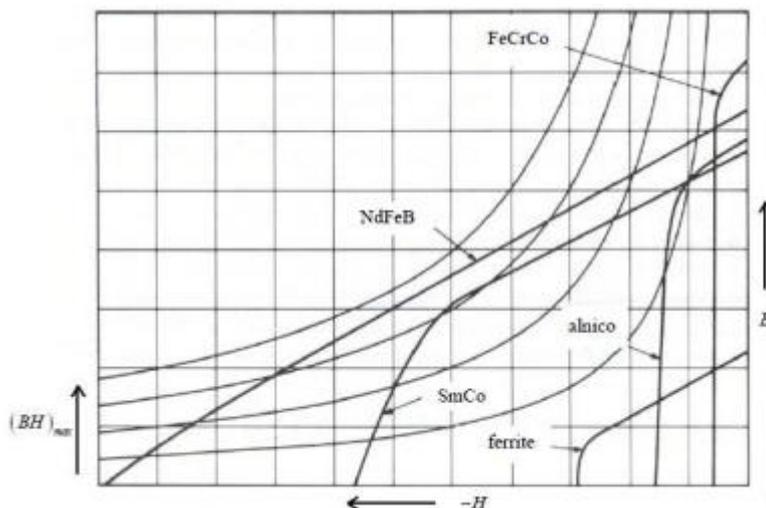


Figura 4.7: Curvas de desmagnetização e do produto energético de alguns materiais magnéticos. [57]

Os materiais magnéticos representados na figura equipam diversos geradores de ímãs permanentes, tendo especial uso para aplicações com características específicas, tornando-se assim necessário descrever as principais vantagens e desvantagens de cada um.

NdFeB (Terras Raras)

- Apresenta uma elevada intensidade de campo magnético;
- Revela um alto valor de remanência e coercitividade;
- Mecanicamente mais resistente que a liga de SmCo;
- Possível de ser utilizado até uma temperatura de 200 graus Célsius;
- Não recomendado no uso de atmosfera com hidrogénio líquido;
- Suscetíveis à corrosão.

SmCo

- Apresenta uma elevada intensidade de campo magnético;
- Ideal para aplicações que exigem um alto rendimento;
- Oferece alta resistência à desmagnetização;
- Possui uma excelente estabilidade térmica;
- Possui uma elevada resistência à corrosão;
- Material de custo elevado;
- Possível de ser utilizado até uma temperatura máxima de 300 graus Célsius;
- Quebra facilmente, não sendo recomendado para uso como componente estrutural.

AlNiCo

- São mais baratos que ímanes de ligas de terras raras (NdFeB);
- Temperatura de funcionamento alta;
- Coeficiente de temperatura baixa;
- Baixa coercitividade quando comparado com outros grupos de ímanes;
- Elevados níveis de campos de indução magnética.

Ferrites

- Bastante Frágeis;
- Pobre estabilidade térmica;
- Mais barato de todos os grupos;
- Possível de ser utilizado até uma temperatura de 300 graus Célsius;
- Elevada resistência à corrosão.

Uma questão importante nas máquinas de ímanes permanentes respeita à variação do grau de magnetização dos ímanes com a temperatura.

Para verificar o grau de desmagnetização efetuam-se diversos testes na máquina.

A desmagnetização pode ser originada por vários fatores, tal como uma alteração na estrutura interna da máquina, devido à presença de choques mecânicos, de campos magnéticos adversos, ao próprio campo desmagnetizante, e às pressões a que estão sujeitos.

Outros fatores que podem levar à sua desmagnetização são as temperaturas altas e o tempo de exposição em ambientes adversos a que estes estão sujeitos, podendo levar à sua corrosão.

Assim sendo, tais ocorrências podem originar alterações na estabilidade magnética dos ímanes permanentes, podendo estas serem alterações permanentes, irreversíveis ou reversíveis.

As alterações permanentes resultam da corrosão ou exposição a temperaturas traduzindo-se numa mudança estrutural no material magnético. Ocorrem quando existe uma degradação da microestrutura do íman, que persiste mesmo que o material seja remagnetizado.

As variações reversíveis na magnetização dos ímanes dizem respeito a uma gama específica de temperatura para cada material. Estas provocam uma agitação nos momentos magnéticos e uma redução temporária da magnetização de saturação até que as condições iniciais sejam estabelecidas.

O coeficiente de temperatura reversível é uma medida da mudança das características magnéticas com a temperatura na gama onde as propriedades do íman revertem para os valores iniciais, quando a temperatura volta para o valor normal de trabalho.

As alterações irreversíveis persistem após a causa ter sido removida e a curva de desmagnetização original só pode ser recuperada remagnetizando o material. [57]

4.3.5 - Gaiola Rotórica

A gaiola rotórica é uma particularidade da máquina, utilizada sobretudo em geração híbrida, de modo a proporcionar um arranque assíncrono inicial, ou seja, arranque direto.

Esta executa um papel amortecedor em situações de perda de sincronismo.

Situada na superfície do rotor e operando em regime síncrono, possui um caráter híbrido após arranque da máquina, sendo este regime imposto pelo movimento dos ímanes permanentes.

De modo a melhorar o funcionamento das máquinas síncronas convencionais durante o arranque, durante a sincronização ou até mesmo para estabilizar o funcionamento, são utilizados circuitos elétricos colocados em ranhuras, originando um enrolamento amortecedor, cujo principal objetivo é criar, durante as variações de velocidade da máquina síncrona, uma maior circulação de corrente em circuitos fechados, uma vez que estes apresentam uma fraca resistência elétrica, originando um campo magnético adicional no entreferro da máquina.

Este enrolamento amortecedor é essencialmente constituído por um conjunto de barras de cobre inseridas em ranhuras, estando conectadas elétrica e mecanicamente nas extremidades por barras de cobre curto-circuitadas nas extremidades.

À medida que o circuito amortecedor se desloca no interior de um campo magnético, induzem-se forças eletromotrizes que estão desfasadas no tempo devido ao afastamento no espaço das ranhuras. Em regime permanente o fluxo magnético não induz forças eletromotrizes nos seus condutores, uma vez que não existe deslizamento, ao contrário do que acontece no arranque, uma vez que a gaiola rotórica serve para que este seja assíncrono.

As variações bruscas de velocidade no arranque provocam a circulação de correntes de elevada intensidade e com frequência variável, pelo que é importante ter isto em conta no dimensionamento dos isolamentos, originando o aparecimento de forças mecânicas que combinadas, fazem surgir um binário que melhora o funcionamento da máquina quando existem variações bruscas de carga, de modo a que não se perca o sincronismo. Por outro lado estas correntes provocarão mais perdas por efeito Joule. [59]

No caso de existirem variações bruscas de carga, para além ou aquém da velocidade de sincronismo, onde a máquina corre o risco de perder o sincronismo, no enrolamento em gaiola, surgem variações no fluxo que atravessam o enrolamento, originando correntes induzidas que produzem binários que amortecem as variações, tendendo a manter o equilíbrio, razão por que o enrolamento se designa de amortecedor.

O efeito referido anteriormente acontece exatamente do mesmo modo no caso de uma máquina de ímanes permanentes dotada de um rotor em gaiola de esquilo.

As principais vantagens da utilização de um rotor híbrido são:

- Menor aquecimento da máquina;
- Maior rendimento energético (IE4);
- Arranque assíncrono;
- Papel amortecedor em caso de perda de sincronismo;
- Não existem correntes no rotor, reduzindo as perdas por Efeito de Joule.

4.4 - Funcionamento

A eficiência de um gerador irá depender do valor das suas perdas, sendo assim importante identificar quais as perdas e onde podem ocorrer. São algumas o conjunto de perdas que ocorrem na conversão eletromecânica, nomeadamente:

- Perdas elétricas;
- Perdas magnéticas: Histerese e correntes de Foucault;
- Perdas mecânicas.

As perdas elétricas manifestam-se por efeito Joule e ocorrem devido à resistência que os condutores oferecem à passagem da corrente elétrica, podendo ocorrer só nos enrolamentos do estator, uma vez que o rotor é de ímanes permanentes.

As perdas magnéticas podem ocorrer por histerese ou correntes de Foucault e a sua origem provém da variação do campo magnético. Caso este campo magnético apresente uma variação no tempo, é possível que surjam correntes de Foucault nas massas metálicas, bem como perdas por histerese nos materiais magnéticos. Já as perdas mecânicas ocorrem devido ao atrito entre o veio e órgãos estáticos, que se traduz na origem de calor que provocará aquecimento na máquina, sendo necessário recorrer a ventilação natural ou forçada.

Como atrás referido, a máquina de ímanes permanentes é uma máquina síncrona, com uma velocidade de sincronismo, sendo que a velocidade de sincronismo (n_s) dada por:

$$n_s = \frac{f}{p} \times 60 \quad (4.1)$$

A frequência f de funcionamento corresponde à frequência imposta pela rede e p é o número de pares de polos da máquina.

Os campos magnéticos girantes estático e rotórico rodam à mesma velocidade, à velocidade de sincronismo, ainda que o primeiro esteja atrasado do segundo de um certo ângulo, uma vez que o número de pares de polos do rotor e do estator são iguais. O sentido de rotação dita a sequência de fases. [60] Caso o gerador seja um gerador de ímanes permanentes híbrido, o seu arranque será assíncrono.

As máquinas síncronas de ímanes permanentes não possuem um circuito de excitação na sua constituição, sendo esta a principal diferença em relação às máquinas síncronas convencionais, o que as impossibilita de controlar e regular o campo indutor e consequentemente a tensão aos seus terminais.

Um exemplo de aplicação é quando a máquina opera isoladamente. Neste caso a tensão aos seus terminais varia bastante, em especial em cargas indutivas. Assim, no caso de se alimentar uma carga indutiva, onde a tensão reduz significativamente à medida que o fator de carga aumenta, com a inserção de uma bateria de condensadores seria possível manter a tensão aproximadamente constante aos seus terminais através da regulação da geração de energia reativa nas baterias.

Quando a máquina opera em paralelo com a rede, a bateria de condensadores não é necessária pois a energia reativa necessária para manter a tensão aos terminais num nível aceitável é absorvida da rede elétrica, embora, esta situação possa resultar numa redução do fator de potência. Uma vez que as máquinas síncronas de ímanes permanentes não possuem capacidade de controlo do campo indutor, o funcionamento da máquina isolada é extremamente afetado pela variação do fator de potência das suas cargas. A correção deste pode ser realizada com a compensação série ou paralelo, sendo a última a mais usual.

Caso o gerador funcione em modo isolado e com carga resistiva, a anisotropia inversa possui alguma capacidade de controlo da tensão, compensando a ausência do sistema de excitação, especialmente se a razão de anisotropia for superior a 2.

- **Força eletromotriz longitudinal de auto-indução em carga:** $E_{id.t}$, resulta por efeito da variação do fluxo magnético de reação longitudinal do induzido da máquina, incluindo respetivas fugas;
- **Força eletromotriz transversal de auto-indução em carga:** $E_{iq.t}$, é obtido por efeito exclusivo da variação temporal do fluxo magnético de reação transversal do induzido da máquina, incluindo as fugas.

Segundo o modelo linear, as forças eletromotrizes apresentam a seguinte configuração:

$$\begin{cases} E_{id.t} = -jX_d I_d \\ E_{iq.t} = -jX_q I_q \end{cases} \quad (5.2)$$

Onde X_d e X_q são as reatâncias síncronas longitudinal e transversal, definidas por:

$$\begin{cases} X_d = X_{md} + X_\sigma \\ X_q = X_{mq} + X_\sigma \end{cases} \quad (5.3)$$

Do modelo acima representado, sabemos que as projeções das grandezas podem ser representadas pelas seguintes equações:

$$I_d = -I \sin(\delta + \varphi) \quad (5.4)$$

$$I_q = I \cos(\delta + \varphi) \quad (5.5)$$

$$U_d = -U \sin \delta = -(X_q I_q + R I_d) \quad (5.6)$$

$$U_q = U \cos \delta = E_o + X_d I_d - R I_q \quad (5.7)$$

Sendo assim possível obter:

$$I_d = \frac{U(X_q \cos \delta + R \sin \delta) - E_o X_q}{R^2 + X_d X_q} \quad (5.8)$$

$$I_q = \frac{U(X_d \sin \delta - R \cos \delta) - E_o R}{R^2 + X_d X_q} \quad (5.9)$$

A partir das componentes ativa e reativa da corrente, $I_a = I \cos \varphi$ e, $I_r = I \sin \varphi$, respetivamente, as relações entre as componentes longitudinal e transversal e as componentes agora definidas são:

$$I_a = I_q \cos \delta - I_d \sin \delta \quad (5.10)$$

$$I_r = -I_d \cos \delta - I_q \sin \delta \quad (5.11)$$

$$I_d = -I_r \cos \delta - I_a \sin \delta \quad (5.12)$$

$$I_q = I_a \cos \delta - I_r \sin \delta \quad (5.13)$$

$$\text{com } I^2 = I_d^2 + I_q^2 = I_a^2 + I_r^2 \quad (5.14)$$

A potência ativa e reativa fornecida à carga, por fase, é definida pelas equações:

$$P = U_d I_d + U_q I_q = E_o I_q + (X_d - X_q) I_d I_q - R I^2 \quad (5.15)$$

$$Q = U_d I_q - U_q I_d = -E_o I_d - X_d I_d^2 - X_q I_q^2 \quad (5.16)$$

A potência ativa desenvolvida no entreferro por fase P_δ , associada ao binário eletromagnético, $T_{el} = \frac{P_\delta}{\omega}$, produzida por interações entre as componentes da corrente e das forças eletromotrizes induzidas no entreferro em fase, é dada por:

$$P_\delta = (E_o + X_d I_d) I_q - X_q I_q I_d \quad (5.17)$$

Esta equação traduz a transformação da potência mecânica em elétrica, e coincide com a potência entregue à carga menos as perdas Joule no enrolamento do estator.

Os parâmetros possíveis de serem deduzidos e necessários para a aplicação do modelo de Blondel simplificado à máquina síncrona de ímanes permanentes, são a resistência do circuito estatórico, R , a força eletromotriz induzida no vazio, E_o , e as reatâncias síncronas longitudinal e transversal, X_d e X_q , respetivamente, tudo valores por fase.

Estes parâmetros definem a ligação entre o projeto da máquina em termos construtivos e o seu funcionamento. A resistência do circuito estatórico depende do enrolamento do estator, a força eletromotriz induzida no vazio e a reatância síncrona longitudinal são determinados pelo enrolamento do estator e pela própria geometria da máquina e dos ímanes.

O valor da força eletromotriz induzida no vazio depende ainda do material dos ímanes e do seu estado de magnetização.

A reatância síncrona transversal é determinada principalmente pelo enrolamento do estator e pela geometria da máquina, sendo pouco afetada pela geometria e disposição dos ímanes.

O método de Blondel simplificado faz uma análise baseada em parâmetros constantes e como existem erros e imperfeições de resultados, é usual utilizarem-se valores ajustados dos parâmetros que consideram algumas não linearidades, permitindo aumentar o domínio de validade do modelo e uma correlação mais próxima com os resultados experimentais.

Os parâmetros referidos acima são variáveis mediante a carga imposta na máquina, apresentando curvas de variação com a corrente, aproximadamente lineares. Na utilização de valores ajustados, é necessário ter em consideração que o valor da força eletromotriz, resultante da presença dos ímanes, depende do induzido, do nível de saturação de circuito magnético e da temperatura destes.

O raciocínio que normalmente leva a supor-se praticamente constante a reatância síncrona transversal e variável a reatância síncrona longitudinal, em modelos de máquinas síncronas convencionais, não pode ser agora aplicado; a presença dos ímanes permanentes implica a existência de uma elevada força magnetomotriz coerciva, para além de que torna a reatância síncrona longitudinal menor que a transversal (anisotropia inversa).

A inclusão da saturação magnética nas leis da variação dos parâmetros deve ser feita pois sempre que possível, em condições que reproduzem o funcionamento da máquina em carga,

ou seja, devem-se evitar medidas em condições não representativas, como situações de vazio ou curto-circuito.

Uma vez que as máquinas de ímanes permanentes apresentam uma excitação intrínseca, a avaliação experimental realizada utilizando técnicas de estimação dos parâmetros que se baseiam só em variações do campo indutor não pode ser implementada.

Este problema estimulou o desenvolvimento de métodos baseados numa análise da distribuição do campo magnético por técnicas computacionais numéricas.

Na maioria das configurações rotóricas das máquinas de ímanes permanentes, o fluxo produzido pela força magnetomotriz estatórica segundo o eixo longitudinal atravessa os ímanes permanentes.

Como a permeabilidade magnética dos ímanes é baixa, o fluxo e o valor correspondente da reatância são reduzidos.

As configurações rotóricas com os ímanes embutidos apresentam nesta direção magnética as pontes de ferro macio laminadas, facilmente saturáveis, e que suportam uma parte considerável de fluxo que atravessa o entreferro. Com exceção das pontes laminadas, o comportamento do circuito magnético, segundo este eixo é substancialmente linear, não sendo de esperar que a reação do induzido vá influenciar muito o estado de saturação deste circuito magnético e, conseqüentemente, o valor da reatância síncrona longitudinal.

A relutância do circuito magnético na direção transversal é menor que a apresentada pelo circuito magnético na direção longitudinal, uma vez que as linhas de fluxo no rotor seguem uma direção paralela aos ímanes permanentes. O maior valor da relutância deste circuito é correspondente ao comprimento radial do entreferro, levando à existência de valores de reatância síncrona transversal superiores aos valores da reatância síncrona longitudinal, apresentando uma anisotropia inversa em relação ao circuito magnético das máquinas síncronas convencionais, como anteriormente noticiado. [57]

Para observarmos melhor este efeito utiliza-se a fórmula da potência por fase desenvolvida no entreferro da máquina de ímanes permanentes:

$$P = P_{\delta} = \frac{V \cdot E_o}{X_d} \sin \delta + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\delta) \quad (W) \quad (5.18)$$

Para uma dada excitação, a potência fornecida ou recebida pela máquina síncrona será então apenas função do ângulo rotórico, havendo assim todo o interesse em escrever a equação descrita acima em função do ângulo δ . [61]

As principais consequências da existência de anisotropia inversa em geradores síncronos de ímanes permanentes são:

- Capacidade de atingir uma potência mais elevada que as máquinas síncronas convencionais;
- Influência positiva no fator de potência da máquina;
- Melhor controlo da tensão aos terminais do gerador.

4.6 - Síntese do capítulo

Neste capítulo foram abordados os aspetos intrínsecos à máquina de ímanes permanentes e foi dada importância à sua constituição e variantes construtivas, concluindo-se que estas máquinas possuem uma enorme flexibilidade de adaptação a diferentes aplicações com exigências diferentes ao nível de robustez, potência e velocidade, tendo sido salientadas as diferentes aplicações possíveis.

Posteriormente, procedeu-se a uma descrição do material constituinte do gerador, concluindo-se que a melhor variante construtiva de ímanes permanentes é realizada à base de ligas de terras raras de Neodímio, Ferro e Boro, uma vez que este material apresenta melhores resultados a nível de preço, abundância de recurso e características magnéticas. Os materiais magnéticos utilizados na sua construção, como ímanes de terras raras são cada vez mais baratos, levando cada vez mais ao aumento do número de unidades produzidas, nomeadamente para aproveitamentos de energias renováveis.

Foi descrito o funcionamento da máquina e examinado o comportamento relativamente às suas perdas, concluindo-se que este tipo de máquinas apresenta perdas baixas, uma vez que não apresenta enrolamentos no rotor, facto que incrementa o seu rendimento. Recorreu-se ao modelo de Blondel simplificado e definiram-se as equações que permitem calcular os valores dos parâmetros da máquina.

Capítulo 5

Investigação Experimental sobre um Gerador de Ímanes Permanentes

5.1 - Introdução

O funcionamento de um gerador de ímanes permanentes é um assunto já testado, contudo, a sua utilização em centrais renováveis tem sido um forte alvo a atingir devido às suas características.

A substituição de outro tipo de máquinas e a opção pela utilização de geradores de ímanes permanentes é cada vez maior para a produção de energia, sendo gradualmente crescente a sua utilização. Este tipo de gerador é projetado para operar a velocidades variáveis, controlados por um inversor ou um acionador de velocidade variável, oferecendo um elevado rendimento. O facto de conter ímanes na sua constituição permite miniaturizar a máquina, oferecendo, para diferentes potências, tamanhos menores, competindo diretamente com as máquinas de indução e com as próprias máquinas síncronas convencionais.

A descoberta de geradores de ímanes permanentes permitiu combinar importantes características como eficiência elevada, velocidade variável, baixo nível de ruído e tamanho reduzido num só “pack”, aliado ao seu maior tempo de vida útil face às máquinas convencionais, o que implica menores manutenções e, conseqüentemente, menores gastos.

A crescente utilização de ímanes de terras raras, um produto barato, é um fator aliado aos citados acima que contribui para a massificação dos geradores de ímanes permanentes no desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis - “verdes”.

A investigação experimental acerca de um gerador de ímanes permanentes teve como principal objetivo a determinação das curvas de características da máquina e sua análise. Na sua realização atenderam-se certos aspetos, tais como segurança nas operações, inspeção das partes constituintes e registo das informações pertinentes. Foram realizados vários ensaios onde se determinou as suas características de funcionamento, operando a máquina em vazio, em modo isolado e ligada à rede.

É de referir a realização da medição dos valores das resistências estáticas de modo a avaliar o comportamento térmico da máquina antes e após o funcionamento.

5.2 - Caraterização do processo experimental

O trabalho experimental desenvolvido incidu na realização de ensaios sobre a máquina de ímanes permanentes enquanto gerador. Para a operação da máquina como gerador, utilizou-se uma máquina primária trifásica controlada por um variador eletrónico de velocidade. Esta máquina exige estar corretamente colocada e ajustada na plataforma de ensaio de modo a que se tornem viáveis os resultados, exigindo um correto alinhamento dos veios.

Os ensaios realizados são descritos abaixo:

- Determinação da Força Eletromotiz variando a velocidade de rotação;
- Determinação da forma de onda de tensão em vazio, para 3 velocidades;
- Ensaio em carga óhmica;
- Ensaio em carga indutiva;
- Ensaio em carga capacitiva;
- Ensaio paralelo à rede.

A realização dos ensaios teve em atenção o aquecimento da máquina. A temperatura desta foi estabilizada para o funcionamento da máquina num período de carga nominal (inicialmente), antes de se iniciarem os ensaios.

No caso do ensaio em vazio, foi determinada a variação da temperatura antes e após o ensaio. A máquina utilizada tem as seguintes caraterísticas:

Tabela 5.1: Tabela de caraterísticas do gerador.

Caraterísticas do gerador	
Tipo	WegWQuatro 1010493040
Tensão Nominal	400/690 V
Corrente Nominal	9.23/5.35 A
Potência	5.5 kW
Cos φ	0.93 i
Frequência	50 Hz
Velocidade Nominal	1500 rpm
Rendimento	92.5%
Classe Isolamento	F

Nos ensaios do gerador a funcionar em modo isolado, a máquina primária apresenta as seguintes caraterísticas:

Tabela 5.2: Tabela de caraterísticas da máquina primária.

Caraterísticas da máquina primária	
Tipo	WegWQuatro 1010478190
Tensão Nominal	400/690 V
Corrente Nominal	9.23/5.35 A
Potência	5.5 kW
Cos φ	0.93 i
Frequência	50 Hz
Velocidade Nominal	1500 rpm
Rendimento	92.5%
Classe Isolamento	F

Para os diferentes tipos de montagem utilizaram-se vários materiais, cada um deles com características específicas, de forma a obter valores de grandezas como a corrente, tensão, potência ativa, e velocidade.

Foram utilizados aparelhos de medição como voltímetros, amperímetros, wattímetros, multímetros, taquímetro, termómetro de mercúrio, e também um variador eletrônico de velocidade, sensor de binário, e uma bateria 12Vdc.

Neste conjunto, existem aparelhos de medição de grandezas do tipo digital e do tipo analógico. O mostrador digital funciona através da conversão de corrente elétrica em sinais digitais por circuitos análogo-digitais, enquanto o mostrador analógico é composto por uma bobine montada em forma de anel à volta de um íman, onde uma corrente elétrica que passa pela bobine cria um campo magnético que fará o ponteiro deslocar-se sobre uma escala.

É necessário que todo o material esteja calibrado corretamente de modo a existir exatidão no resultado.

Na figura 5.1 é possível observar um carrinho com material com o qual se efetuou a medição dos diferentes valores da resistência estática.

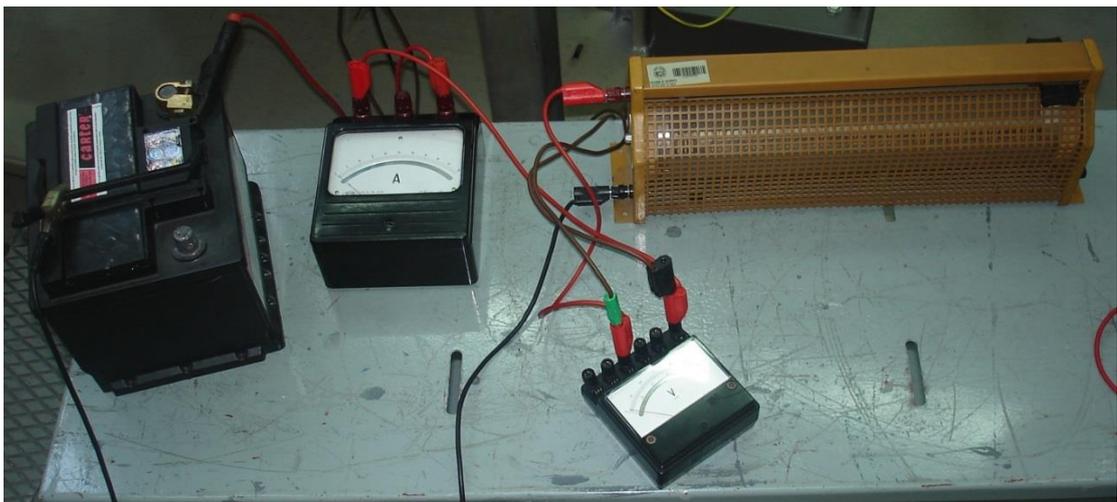


Figura 5.1:Esquema de montagem da medição dos valores da resistência estática.

A realização dos diferentes ensaios com a máquina a operar isoladamente foi realizada com o seguinte layout experimental:



Figura 5.2: Representação do Layout utilizado.

Para além do material citado acima, conectaram-se diferentes cargas ao gerador no ensaio em modo isolado com as seguintes características:

Tabela 5.3: Características da carga resistiva utilizada.

Carga Resistiva
Potência: 4 kW
Monofásico 230 V
Trifásico: 230/400 V

Tabela 5.4: Características da carga indutiva utilizada.

Carga Indutiva
Potência: 4 kVar
Monofásico 230 V
Trifásico: 230/400 V

Tabela 5.5: Características da carga capacitiva utilizada.

Carga Capacitiva
Potência: 4 kVar
Monofásico 230 V
Trifásico: 230/400 V

5.3 - Atividade Experimental

5.3.1 - Determinação dos valores da resistência estática

O principal objetivo deste ensaio é conhecer o valor da resistência do estator à temperatura ambiente, de modo a ser possível determinar a temperatura de funcionamento da máquina para regimes de funcionamento diferentes, utilizando uma correção para a temperatura de referência correspondente à classe de isolamento desta.

Uma vez que a impedância dos enrolamentos da máquina possui um valor de uma componente indutiva forte e as suas resistências normalmente possuem valores baixos, estas podem assim ser determinadas com utilização do método do voltímetro-amperímetro, onde a fonte de alimentação de corrente contínua é uma bateria que garante um valor estabilizado e constante da tensão de alimentação. Na realização deste ensaio são medidos os valores das resistências entre os pares de terminais do estator à temperatura ambiente e com a máquina desativada há algumas horas, pois a temperatura no seu interior é igual à temperatura ambiente, garantindo fiabilidade nos resultados obtidos.

O valor da resistência estática, por fase, é igual à metade da média aritmética dos valores obtidos nas diferentes fases, independentemente da ligação real dos enrolamentos.

É desaconselhado a utilização do multímetro na medição destes ensaios devido à sua falta de rigor. A utilização deste método foi realizada com o carrinho de material disponibilizado no laboratório.

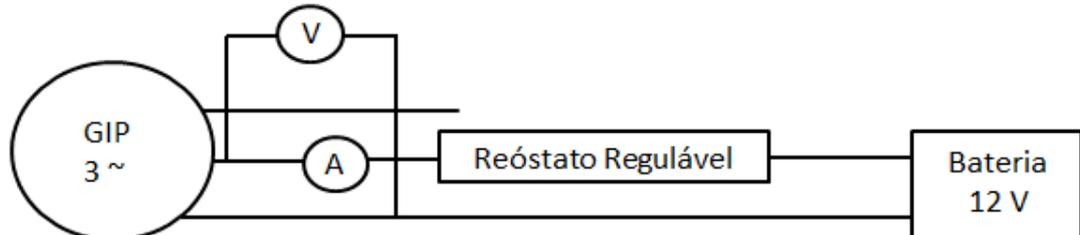


Figura 5.3: Esquema de montagem do método voltímetro-amperímetro.

O método fundamenta-se na aplicação da lei de Ohm a um circuito com uma fonte de tensão contínua a 12V, no qual é possível regular a corrente com o reóstato para diferentes valores, possibilitando a obtenção de diversos valores de tensão e corrente, onde posteriormente se determinará o valor médio das resistências. A medição deverá ser efetuada rapidamente, uma vez que a corrente circulante aquecerá os enrolamentos do estator.

O material utilizado foi o seguinte:

- Amperímetro;
- Bateria 12V DC;
- Cabos de ligação;
- Gerador de ímãs permanentes;
- Reóstato regulável;
- Termómetro;
- Voltímetro.

R_{Tref} : Resistência por fase do estator para a temperatura de referência.

R_{Tamb} : Resistência por fase do estator à temperatura ambiente.

α : Coeficiente igual a 235 para enrolamentos em cobre.

T_{ref} : Temperatura de referência para a classe de isolamento.

T_{amb} : Temperatura ambiente.

$$R_{(Tref)} = \frac{\alpha + T_{ref}}{\alpha + T_{amb}} R_{(Tamb)} \quad (5.1)$$

Assim, de modo a determinar a temperatura de funcionamento da máquina após uma paragem de funcionamento prolongada, procedeu-se à medição dos valores da temperatura ambiente através de um termómetro, onde se obteve 18 graus Celsius, e posteriormente procedeu-se ao cálculo da resistência estatórica entre fases, obtendo os seguintes resultados:

$$R_{med} = \frac{1.17 + 1.17 + 1.16}{6} = 0.585486 \, \Omega \quad (5.2)$$

Aplicando o critério de correção de temperatura, resulta:

$$R_{T1} = \frac{235 + 115}{235 + 18} \times 0.585486 = 0.809960 \, \Omega \quad (5.3)$$

Após obtido o valor da resistência para uma temperatura de funcionamento de 18 graus Celsius, prosseguiram-se a realização dos diversos ensaios laboratoriais sobre o gerador.

5.3.2 - Determinação do valor da força eletromotriz, E_o

A força eletromotriz (f.e.m.), E_o , é uma propriedade que os dispositivos possuem quando a sua tendência é gerar corrente elétrica num circuito. Trata-se de uma grandeza escalar cuja unidade é o volt. Neste caso E_o representa o valor eficaz da f.e.m. desenvolvida, em vazio, no estator da máquina, entre fases.

Uma vez que a máquina, quando opera em vazio, não permite que circule corrente no estator, o valor desta força é igual ao valor da tensão aos terminais da máquina. Esta força depende sobretudo da variação do fluxo magnético que atravessa o entreferro e, uma vez que o nível de saturação deste não é alterado, E_o apresenta um valor proporcional à velocidade de rotação.

De modo a obter os diferentes valores de tensão, varia-se a velocidade da máquina primária através do variador eletrónico de velocidade, originando uma reta no seu gráfico de resultados, como esperado.

A força eletromotriz pode também ser obtida através da seguinte expressão, quando ocorre excitação magnética.

$$E_o = 2\pi f \frac{N_e D L}{m.p} \cdot B \quad (5.4)$$

f – Frequência

N_e – Número total de espiras

m – Número de fases

D – Diâmetro interior do estator

L – Comprimento axial do núcleo

p – Número de pares de pólos

B – Valor eficaz da indução magnética

Uma vez que existem parâmetros desconhecidos, torna-se indispensável que se determine o valor de E_o através do método aparentemente mais simples. Para tal, procedeu-se à execução da seguinte montagem, representada na figura:

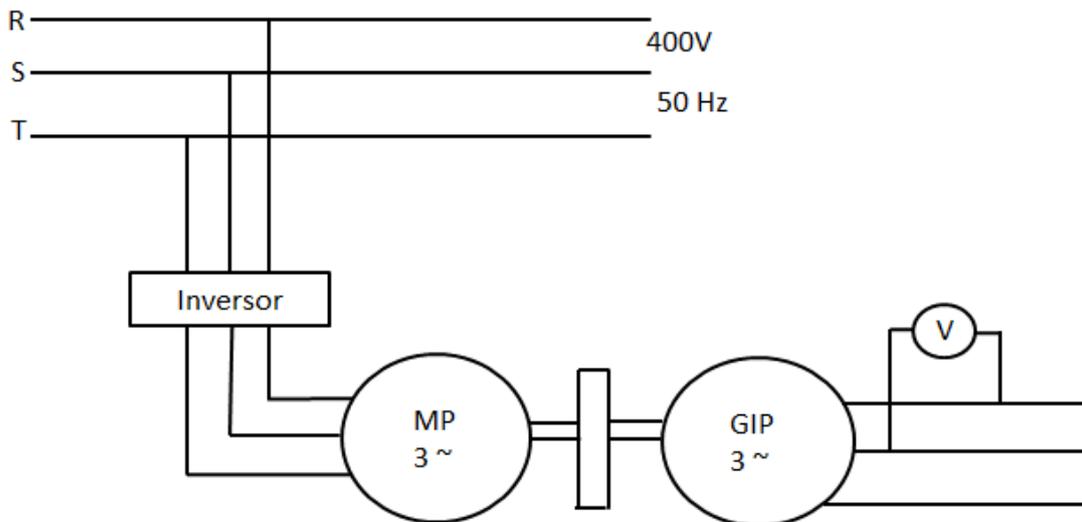


Figura 5.4: esquema de montagem para a determinação da força eletromotriz.

O material utilizado neste ensaio foi o seguinte:

- Gerador de ímanes permanentes;
- Máquina Primária;
- Sensor de binário;
- Variador eletrónico de velocidade;
- 2 Voltímetros;
- Multímetro;
- Cabos de ligação.

Variação da força eletromotriz com a velocidade

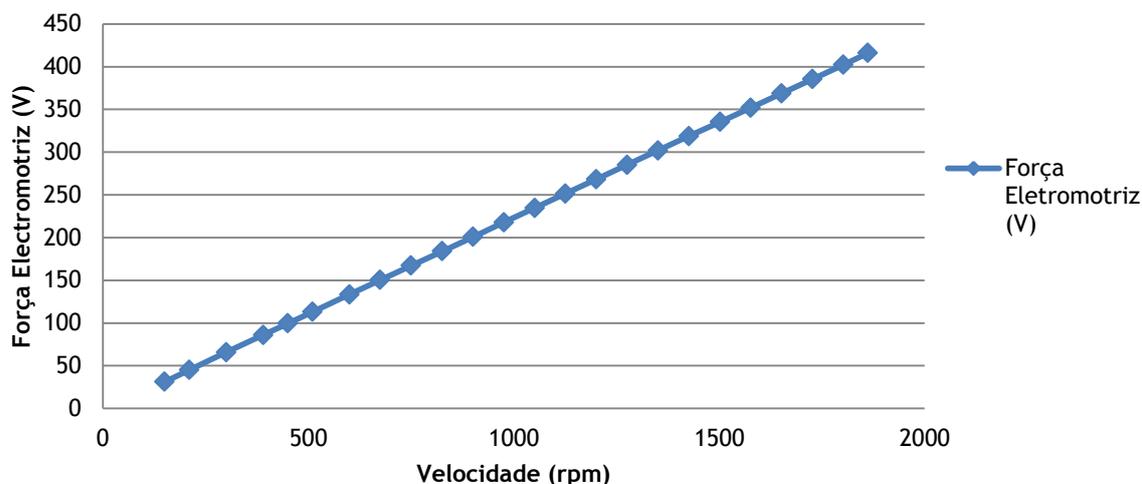


Figura 5.5: Variação do valor da força eletromotriz aos terminais do gerador com a velocidade.

Analisando o gráfico representado acima e consultando a tabela de resultados deste ensaio em anexo, conclui-se que para o valor da velocidade nominal (1500 rpm), a tensão obtida é de 335 Volts, valor inferior ao representado na chapa características da máquina (400 V). Este valor de tensão explica que a máquina inicialmente foi projetada para funcionar como motor e não como gerador.

Potência mecânica desenvolvida em função da variação da velocidade

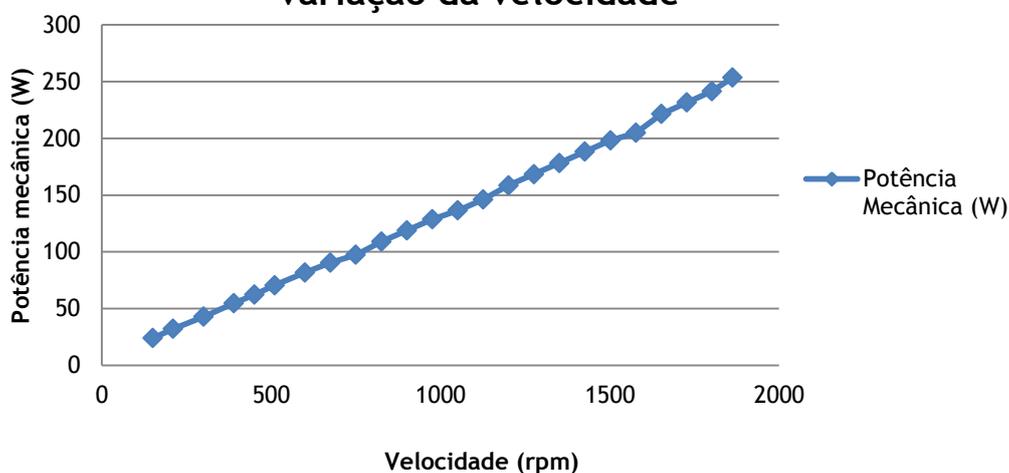


Figura 5.6: Representação gráfica da potência mecânica desenvolvida em função da velocidade.

É de notar que o valor da potência mecânica produzida é cada vez maior à medida que velocidade de rotação aumenta. Tal facto é justificado pela expressão $P = \frac{T \cdot 2\pi n}{60}$, onde a potência mecânica P é igual à multiplicação do binário pela velocidade de rotação, juntamente com 2π . Deste modo, aumentando a velocidade aumenta-se também a potência produzida pela máquina primária.

Binário resultante para diversos valores de velocidade

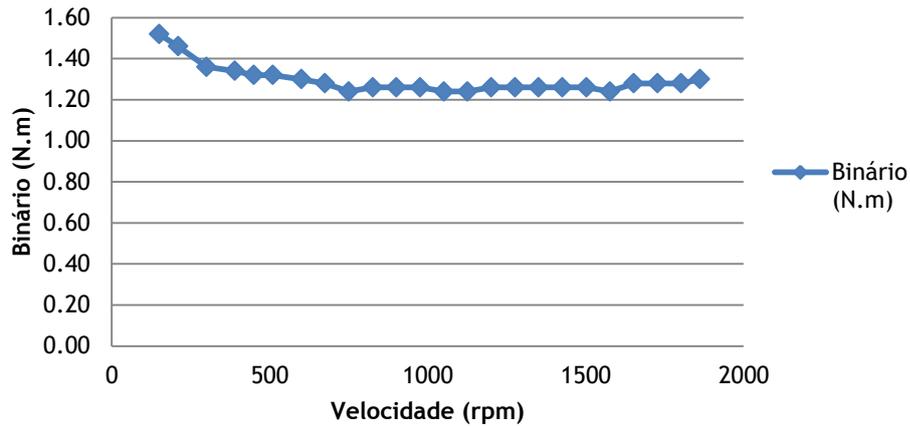


Figura 5.7: Representação de diferentes valores do Binário em função da velocidade.

O comportamento do binário em função da variação da velocidade, apresenta valores estáveis e menores que os iniciais à medida que a velocidade de rotação aumenta.

Este resulta, inicialmente apenas das perdas mecânicas (atrito) e, posteriormente, à medida que a velocidade sobe, juntam-se-lhes as perdas magnéticas da máquina, que se acentuam.

Inicialmente, os valores tendem a decrescer, pois segundo a fórmula $T = \frac{P}{2\pi n}$, para determinada potência, à medida que a velocidade de rotação aumenta o binário será menor. Contudo verifica-se que somadas as perdas magnéticas após aumento de velocidade, os valores tendem a estabilizar ou a crescer ligeiramente.

5.3.3 - Determinação do valor da temperatura após ensaio em vazio

De modo a determinar a temperatura final de funcionamento da máquina após o ensaio em vazio, estando a máquina apenas sob o efeito da força eletromotriz e perdas, procedeu-se à medição da resistência do estator de modo a descobrir o valor da temperatura da máquina após o ensaio em vazio.

A temperatura ambiente tem o valor de 19,5 graus Celsius e foram obtidos os seguintes resultados com a correção da temperatura para a inicial, 18 graus Celsius.

$$R_{\text{med}} = \frac{1.21+1.20+1.20}{6} = 0.6017 \Omega \quad (5.5)$$

Verifica-se que existe um aumento de resistência estatórica de 0.5855 para 0.6017, o que leva a concluir que temperatura aumentou.

Deste modo, para determinar a temperatura final utiliza-se a seguinte fórmula:

$$0.6017 = \frac{(235+T)}{(235+18)} \times 0.5855 \quad (5.6)$$

onde a Temperatura final é dada por $T = 25.00$ graus Celsius.

Conclui-se assim que, após o ensaio em vazio, a máquina aqueceu cerca de 7 graus Celsius, valor baixo e aceitável que não afeta significativamente o desempenho dos ímanes.

5.3.4 - Análise da forma de onda da força eletromotriz em vazio e constituição harmónica para 3 velocidades

Durante o ensaio em vazio foi analisada a forma de onda da força eletromotriz desenvolvida pelo gerador, e a sua constituição harmónica, para diversos valores de frequência gerada (aqui igual à do inversor, pois a máquina de acionamento também é síncrona e com igual número de pólos).

Assim, para além do material utilizado anteriormente descrito, utilizou-se também um osciloscópio e um transdutor. Foram obtidos valores para as frequências de 40 Hz, 50 Hz e 60 Hz.

As seguintes imagens foram obtidas através do osciloscópio e representam o funcionamento para 50 Hz.

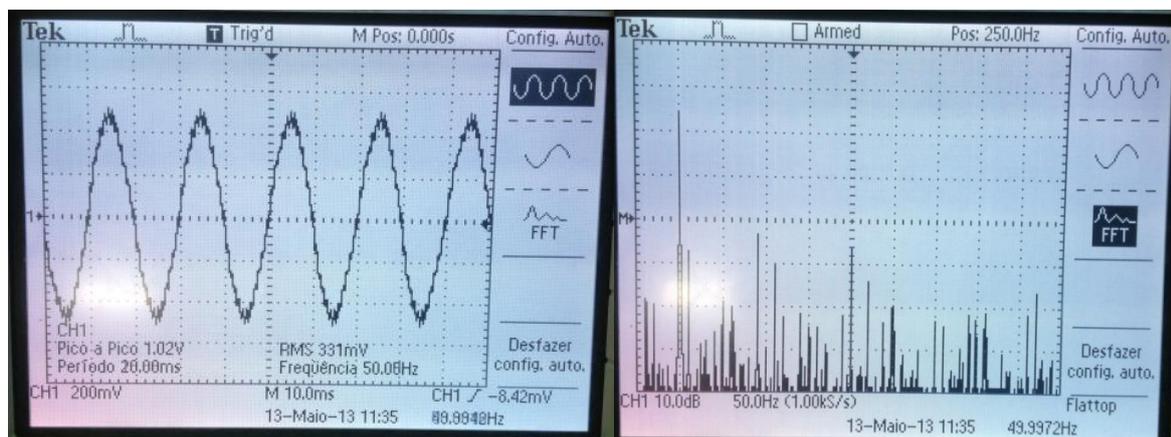


Figura 5.8: Análise da forma de onda da tensão aos terminais do gerador para 50Hz (à esquerda) e análise ao espectro harmónico para a mesma situação (à direita).

Analisando a forma de onda da tensão, conclui-se que esta apresenta algum ruído originado de distorção harmónica e que a sua amplitude é reduzida quando comparada à amplitude da frequência fundamental.

Os harmónicos surgem devido à disposição dos ímanes no rotor e às ranhuras existentes no rotor e estator da máquina.

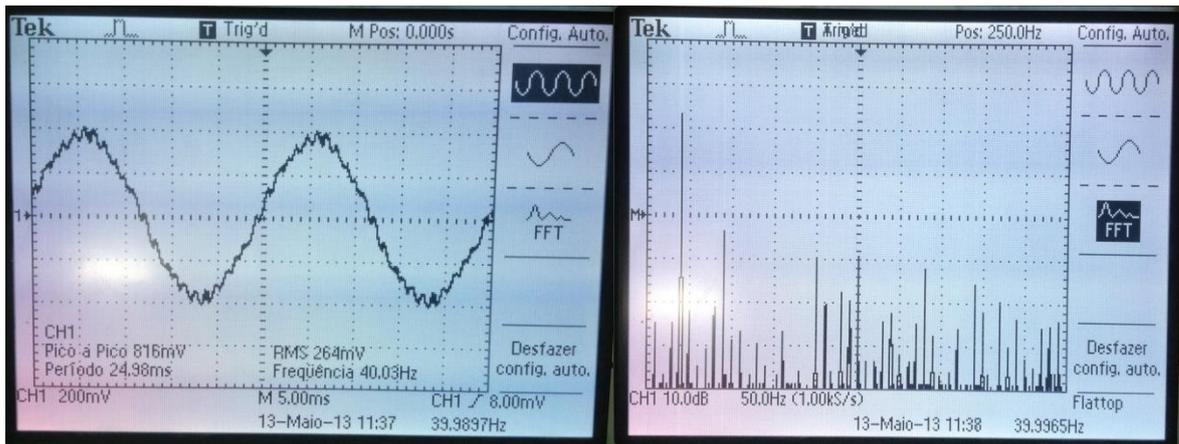


Figura 5.9: Análise da forma de onda da tensão aos terminais do gerador para 40Hz (à esquerda) e análise ao espectro harmônico para a mesma situação (à direita).

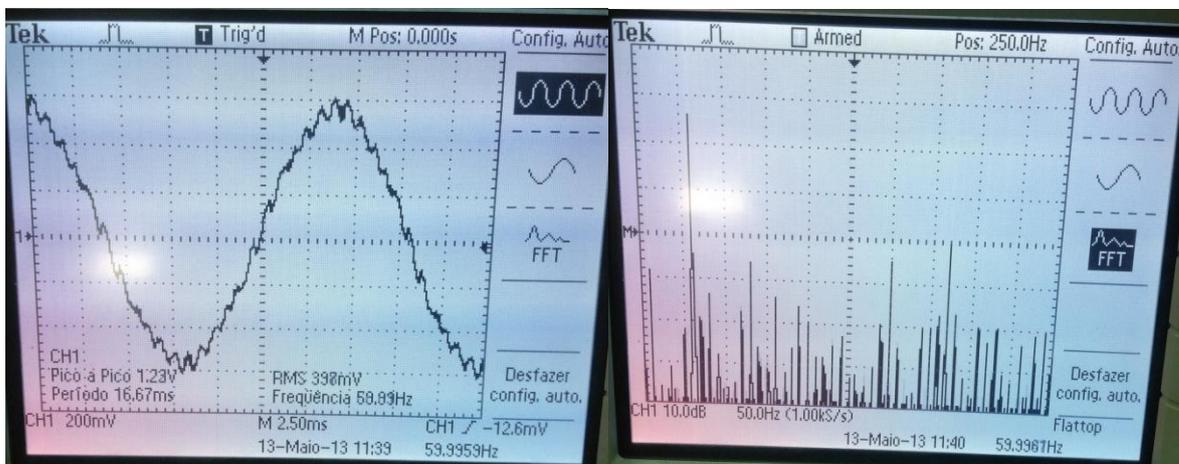


Figura 5.10: Análise da forma de onda da tensão aos terminais do gerador para 60Hz (à esquerda) e análise ao espectro harmônico para a mesma situação (à direita).

Observando os resultados para as frequências de 40 Hz e 60 Hz, conclui-se que a distorção harmônica aumenta à medida que a frequência aumenta, e que não existem alterações significativas ao nível da forma de onda de tensão.

5.3.5 - Ensaios com o gerador funcionando em modo isolado

A realização destes ensaios tem como principal objetivo a determinação das características de funcionamento do gerador, operando em modo isolado e com a utilização de diversos tipos de carga (ôhmica, indutiva, capacitiva).

A obtenção de diferentes valores a partir destes ensaios permite obter o cálculo da potência ativa, potência reativa, potência mecânica, valor do rendimento, fator de potência e as perdas. Para tal utilizam-se as seguintes expressões:

$$\text{Potência Mecânica } (P_{mec}) = \frac{2\pi nT}{60} \text{ (W)} \quad (5.7)$$

Onde T (N.m) representa o binário, e n (rpm) a velocidade de rotação. Utilizando o método dos dois wattímetros, é possível calcular os diferentes valores que a potência ativa, potência reativa e fator de potência apresentam. Para tal recorrem-se às seguintes equações:

$$\text{Potência Ativa } (P) = W1 + W2 \text{ (W)} \quad (5.8)$$

$$\text{Potência Reativa } (Q) = \sqrt{3} \times (P_{w1} + P_{w2}) \text{ (Var)} \quad (5.9)$$

$$\text{Potência Aparente } (S) = \sqrt{(P^2 + Q^2)} \text{ (VA)} \quad (5.10)$$

$$\text{Fator de Potência } (\cos \varphi) = \frac{P}{S} \quad (5.11)$$

Obtidos os diferentes valores da potência ativa e potência mecânica, é possível calcular o rendimento da máquina. Assim,

$$\text{Rendimento } (\eta) = \frac{P}{P_{mec}} \quad (5.12)$$

O valor das perdas é dado por:

$$\text{Perdas } (p) = P_{mec} - P \quad (5.13)$$

Na realização destes ensaios utilizaram-se regras de manutenção e material especificado para a operação do gerador em modo isolado. Desta forma, recorreu-se à seguinte lista de material:

- Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes;
- Máquina Primária;
- Sensor de binário;
- Multímetro;
- Voltímetro;
- Amperímetro;
- Dois wattímetros;
- Taquímetro;
- Carga resistiva;
- Carga indutiva;
- Carga capacitiva;
- Cabos de ligação.

O procedimento utilizado nos ensaios foi igual para as três cargas utilizadas. Inicialmente a máquina ficou em funcionamento à plena carga cerca de uma hora de modo a que esta aquecesse e fosse possível determinar o valor da sua temperatura inicial antes de efetuar o ensaio, levando-a à sobrecarga. Assim, utilizaram-se os seguintes passos:

1. Funcionamento cerca de uma hora com a máquina à plena carga;
2. Elevar a carga até cerca de 25% de sobrecarga;

3. Rapidamente medir os valores de tensão, corrente, sensor de binário e leitura dos dois wattímetros;
4. Reduzir sucessivamente o valor da carga e repetir o passo anterior;
5. Durante a alteração do valor da carga é necessário verificar a velocidade e ajustar o valor de frequência de modo a que está permaneça constante nos 50 Hz.

5.3.5.1 - Ensaio com o gerador funcionando em modo isolado com carga ôhmica

Na realização deste ensaio colocaram-se três cargas em paralelo, de 4 kW cada, de modo a que se conseguisse elevar o funcionamento do gerador à sobrecarga de aproximadamente 25%.

Contudo, no funcionamento à carga nominal de modo a que a máquina aquecesse utilizaram-se apenas duas cargas de 4 kW em paralelo.

O valor da resistência média estatórica antes da realização do funcionamento à plena carga é o seguinte:

$$R_{med} = \frac{1.1925+1.1875+1.19}{6} = 0.595 \Omega \quad (5.14)$$

Assim, a temperatura de funcionamento é a seguinte:

$$0.595 = \frac{(235+T)}{(235+18)} \times 0.5855 \rightarrow T = 22.10 \text{ Graus Celsius.} \quad (5.15)$$

E após um período prolongado de funcionamento à carga nominal é:

$$R_{med} = \frac{1.3525+1.3450+1.3475}{6} = 0.6742 \Omega \quad (5.16)$$

Neste caso, a temperatura de funcionamento será a seguinte:

$$0.6742 = \frac{(235+T)}{(235+18)} \times 0.5855 \rightarrow T = 56.33 \text{ Graus Celsius.} \quad (5.17)$$

A realização deste ensaio com frequência constante (50Hz) e a 56.33°C, irá permitir obter valores mais rigorosos de características de funcionamento do que se a máquina estivesse a funcionar “a frio”. Neste ensaio existe circulação de corrente no estator da máquina, o que não se verifica no ensaio em vazio e, tal como neste, também não existirá circulação de energia reativa entre o gerador e a carga uma vez que esta é puramente resistiva.

A obtenção dos diferentes valores passa pela utilização de um amperímetro para medição da corrente na saída do gerador, um voltímetro que medirá a tensão composta aos terminais deste e dois wattímetros que fornecem o valor de potência ativa que é oferecida à carga, como representado na figura abaixo. São medidos também a velocidade de rotação e o binário resistente desenvolvido pela máquina em teste.

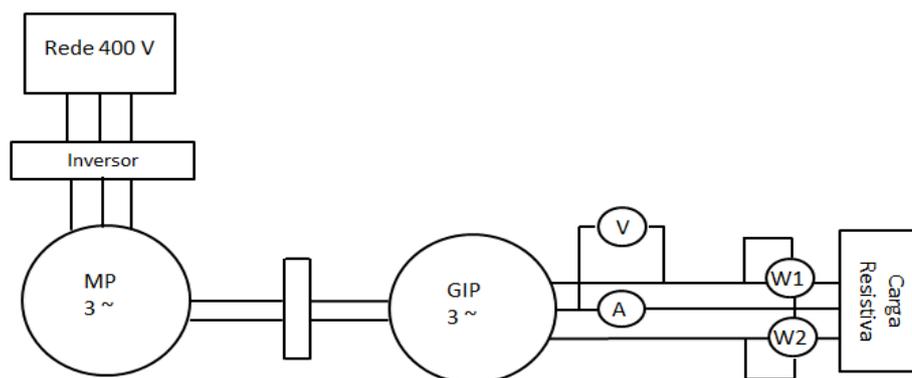


Figura 5.11: Esquema de montagem com carga ôhmica.

Realizada a montagem, foram registados os diferentes valores medidos para os diversos valores de fator de carga como descrito acima, sendo o fator de carga definido pela divisão da corrente obtida pelo valor da corrente nominal, 9.23 A.

Os valores obtidos no ensaio em carga estão representados em anexo. A partir desses resultados experimentais e usando os algoritmos já apresentados, calcularam-se algumas grandezas derivadas: potência absorvida, potência de perdas, rendimento e fator de potência. Tais resultados apresentam-se graficamente nas seguintes figuras.

Alteração da Tensão com o Fator de Carga

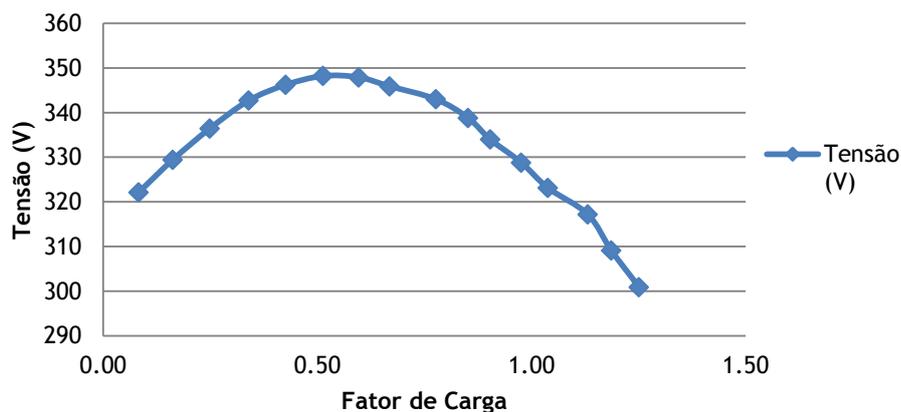


Figura 5.12: Representação gráfica da alteração dos valores da tensão em função do fator de carga.

Analisando o gráfico da variação de tensão com o fator de carga, conclui-se que a tensão sobe desde que se opera a um baixo fator de carga, até a um valor de fator de carga de 54%, descendo a partir deste ponto até ao valor de sobrecarga de 25%. Este aumento de tensão inicial e posterior abaixamento surge devido à anisotropia inversa. Quando a razão de anisotropia é superior a dois, a tensão nos terminais do gerador em carga é superior à força eletromotriz em vazio.

Deste modo, conclui-se que esta máquina apresenta uma razão anisotrópica superior a 2, o que permite ao gerador quando funciona isoladamente e alimenta uma carga resistiva, alguma capacidade de regulação de tensão. Se a carga é resistiva, é possível obter uma regulação de tensão nula ou negativa. Uma vez que a razão de anisotropia é elevada, a possível desvantagem nesta máquina sobre a inexistência de um sistema indutor clássico e necessidade de compensação de fator de potência, é assim deste modo atenuada. [55]

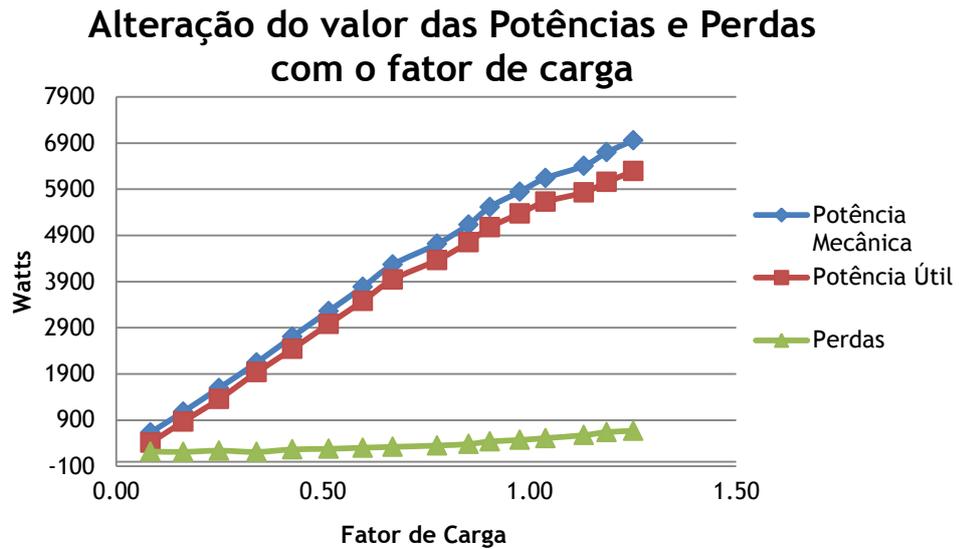


Figura 5.13: Representação gráfica da alteração do valor das potências e perdas com o fator de carga.

Observando o gráfico acima representado, conclui-se que, à medida que o fator de carga aumenta, aumenta também o valor da potência absorvida (potência mecânica), potência útil e as perdas. Este facto ocorre pois a carga necessita de uma potência superior, à medida que o fator de carga aumenta, tornando-se necessário elevar a potência mecânica e o binário fornecido pela máquina primária ao gerador de ímãs permanentes, estando a regulação a cargo do inversor de velocidade, que mantém a velocidade nas 1499 rotações por minuto.

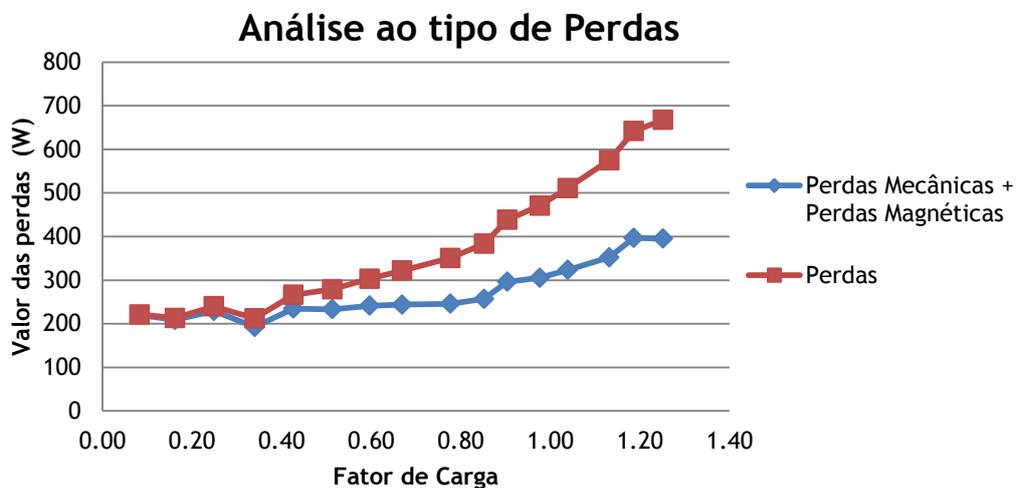


Figura 5.14: Representação gráfica dos diferentes tipos de perdas e alteração com o fator de carga.

Observando a figura que descreve a análise ao tipo de perdas, conclui-se que com um fator de carga mais baixo as perdas existentes são essencialmente perdas mecânicas e perdas magnéticas.

À medida que aumenta o fator de carga, o valor das perdas aumenta, aumentando também a diferença para com as perdas mecânicas e magnéticas, fazendo notar que a maioria das perdas existentes nesse caso serão perdas por efeito Joule, devido ao aumento da

corrente. O cálculo das perdas mecânicas com as perdas magnéticas é justificado pela seguinte expressão:

$$p_{mec} + p_{mag} = P_{totais} - 3R_{funcionamento\ 56^{\circ}C} \cdot I^2 \quad (5.18)$$

As perdas no ferro do estator das máquinas de ímanes permanentes variam com a tensão nos seus terminais quando comparadas com as máquinas síncronas convencionais, devido à redistribuição do fluxo produzido pela reação do induzido. Salienta-se o facto das máquinas com os ímanes colocados à superfície do rotor apresentarem perdas por Foucault nos próprios ímanes que podem atingir valores consideráveis, principalmente quando estes são constituídos por materiais com resistividade moderada, como as terras raras. Um meio eficaz de reduzir estas perdas consiste em segmentar os ímanes. [55]

O gráfico da variação do rendimento com o fator de carga é representado na figura 5.14:

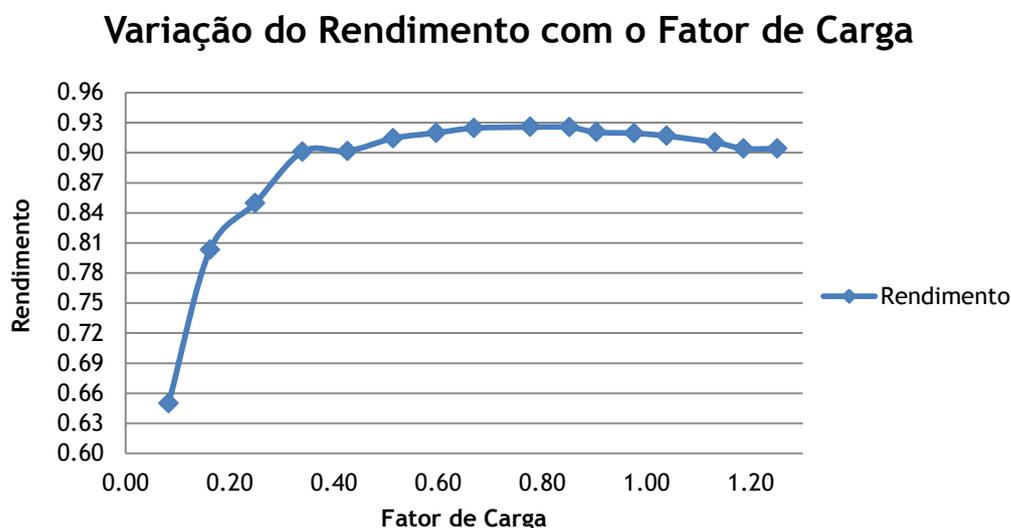


Figura 5.15: Alteração do valor do rendimento para diferentes fatores de carga.

É de destacar os elevados valores de rendimento obtidos neste gerador, onde o máximo valor é de 92.56%. Como motor, a máquina apresenta um índice de eficiência “IE4 Super Premium”, pertencente à mais recente geração de tecnologia de máquinas eficientes no mercado. Uma máquina com esta característica é uma máquina que apresenta pelo menos uma diferença de 15% de perdas em relação à classe de eficiência abaixo (IE3).

Uma vez que a carga a alimentar é uma carga óhmica, o fator de potência é 1. Contudo, não se trata de uma situação perfeita e existem erros tanto ao nível de material como ao nível de leitura.

O gráfico do fator de potência em função do fator de carga é representado na figura 5.16 e demonstra os resultados obtidos na leitura dos dois wattímetros, e as imperfeições, estando contudo próximos do valor perfeito, 1.

Variação Fator de Potência com Fator de Carga

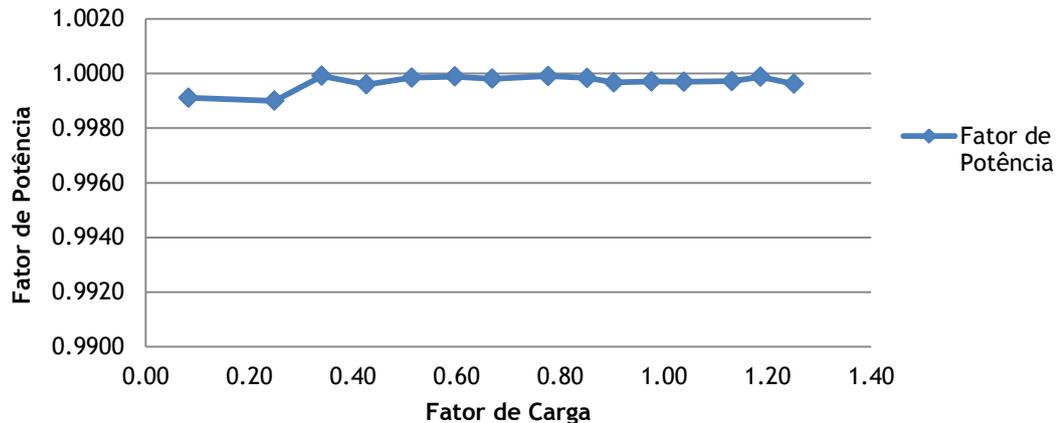


Figura 5.16: Alteração dos valores do fator de potência para diferentes valores de fator de carga.

Após a realização do ensaio com carga ôhmica, foram medidos os enrolamentos estáticos da máquina de modo a avaliar o comportamento da temperatura. Os valores obtidos para o cálculo da resistência média foram:

$$R_{med} = \frac{1.315+1.3125+1.315}{6} = 0.65708 \Omega \quad (5.19)$$

Deste modo, a temperatura final de funcionamento é de:

$$0.65708 = \frac{(235+T)}{(235+18)} \times 0.5855 \rightarrow T = 48.93 \text{ Graus Celsius.} \quad (5.20)$$

É possível concluir que a máquina arrefeceu cerca de 8 °C. Este facto ocorreu porque inicialmente o gerador de ímãs permanentes funcionou durante um período prolongado à plena carga e durante um curto período a uma sobrecarga de cerca de 25%, onde foram retirados pontos de funcionamento, diminuindo gradualmente o valor da corrente até atingir um funcionamento em vazio, fenómeno que explica a diminuição de temperatura verificada.

5.3.5.2 - Ensaio com o gerador funcionando em modo isolado com carga indutiva

Na realização deste ensaio colocaram-se 5 cargas indutivas, de 4 KVar cada, reguláveis, em paralelo de modo a perfazer a sobrecarga do gerador. Existirá agora circulação de energia reativa entre o gerador e a carga devido à natureza desta. O ensaio foi realizado a uma velocidade constante de 1500 r/min.

O esquema de montagem utilizado foi o seguinte:

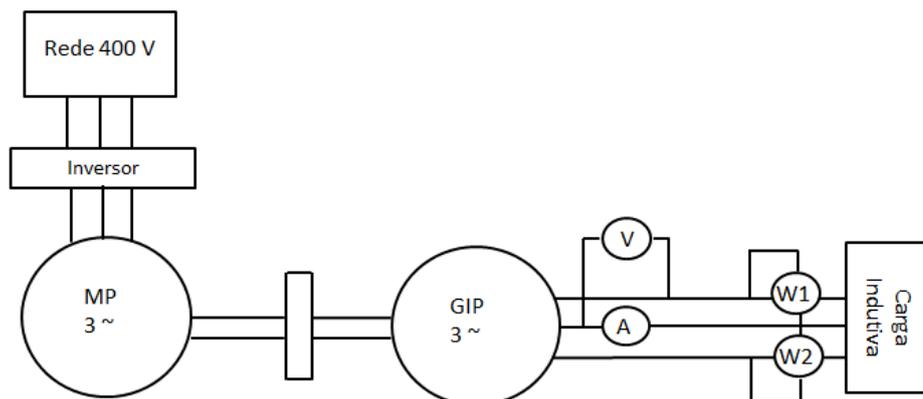


Figura 5.17: Esquema de montagem com carga indutiva.

À semelhança do ensaio com carga ôhmica, foram obtidos os valores da resistência estatórica para este ensaio, antes de se iniciar o funcionamento do gerador, sendo o valor da resistência média o seguinte:

$$R_{med} = \frac{1.305+1.3125+1.3075}{6} = 0.65412 \Omega \quad (5.21)$$

Deste modo, a temperatura inicial de funcionamento é de:

$$0.65412 = \frac{(235+T)}{(235+18)} \times 0.5855 \rightarrow T = 47.68 \text{ Graus Celsius.} \quad (5.22)$$

Como seria de esperar, a temperatura baixou com a máquina em repouso. O procedimento de análise de dados foi idêntico ao executado para carga resistiva. Elevou-se o funcionamento da máquina até à sobrecarga de aproximadamente 10%, e retiraram-se os dados das diferentes características.

Se puras, as cargas indutivas armazenam energia no seu campo magnético e devolvem-na totalmente ao gerador, não exercendo nenhum binário resistente no rotor. A energia mecânica absorvida pelo gerador produzirá perdas, como o efeito de Joule, uma vez que as cargas não são exatamente ideais e comportam uma pequena resistência (a resistência das bobines que as constituem), tornando-se necessário compensar estas perdas do gerador. O tipo de carga utilizado não é totalmente pura, notando-se a presença de uma ligeira componente resistiva.

Variação Tensão com Fator Carga

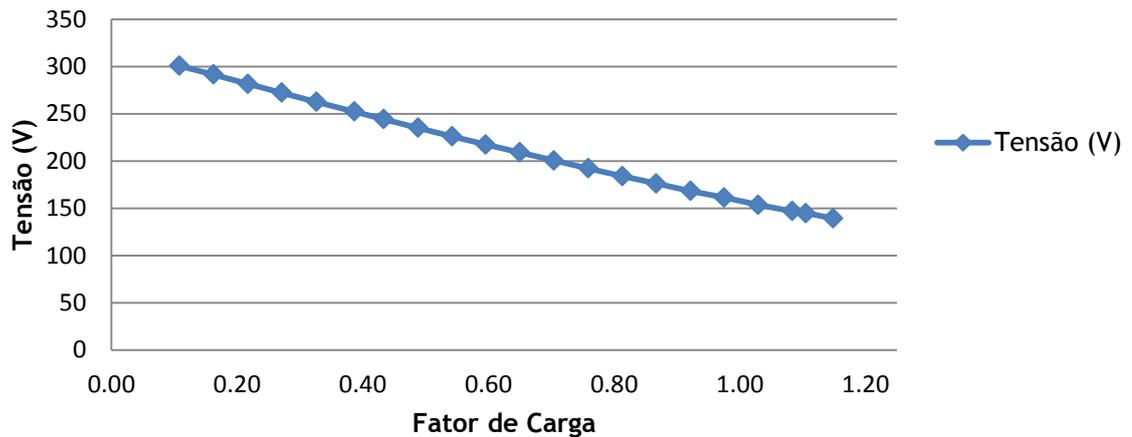


Figura 5.18: Gráfico que representa o comportamento da tensão com a alteração do fator de carga.

Analisando o gráfico, concluímos que quando se alimenta uma carga indutiva, à medida que o fator de carga aumenta, a tensão desce.

Como a carga consome energia reativa, o trânsito de energia reativa do gerador para a carga, torna mais fraco o campo magnético, e provocará uma diminuição no valor da tensão nos terminais do gerador. Assim, a corrente indutiva cria um efeito desmagnetizante na máquina, reduzindo a força eletromotriz induzida e conseqüentemente reduzindo a tensão aos seus terminais.

Devido a este efeito desmagnetizador característico da carga, de modo a manter o valor da tensão nominal do gerador, será necessário um grande aumento da corrente.

De modo a confirmar o que foi citado atrás, verifica-se um aumento do trânsito de energia reativa do gerador para a carga, à medida que a carga aumenta, como é possível observar no gráfico da figura seguinte.

Variação da Potência Reativa com o Fator de Carga

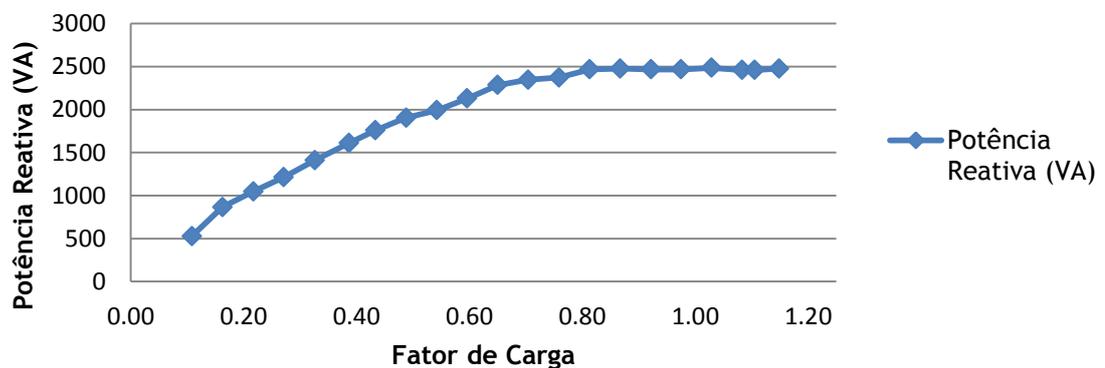


Figura 5.19: Gráfico que representa o comportamento da potência reativa com o fator de carga.

De modo a manter a tensão constante, realizando compensação dos diferentes valores do fator de potência, torna-se necessária a utilização de uma bateria de condensadores. Uma

vez que o que se pretende neste ensaio é a determinação das características de funcionamento isolado de um gerador, não é necessário recorrer a esse uso.

Variação Fator Potência com alteração do Fator Carga

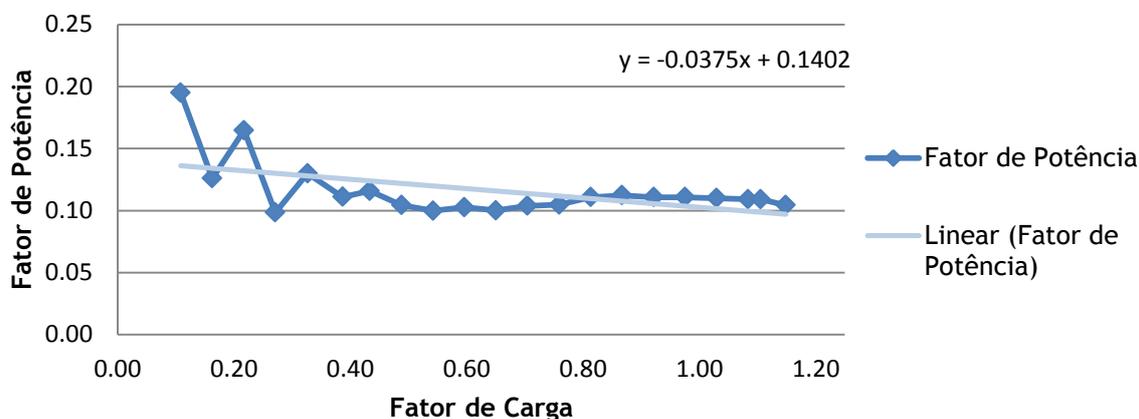


Figura 5.20: Gráfico que representa o comportamento dos valores do fator de potência com o fator de carga.

O fator de potência diminui à medida que o fator de carga aumenta, apresentando o comportamento típico de uma carga indutiva. Foi traçada uma linha de tendência que representa a tendência de seguimento dos pontos com alteração do fator de carga, e representa os pontos que se afastam devido a erros de leitura, ou outros.

Variação das Potências e das Perdas com alteração do Fator de Carga

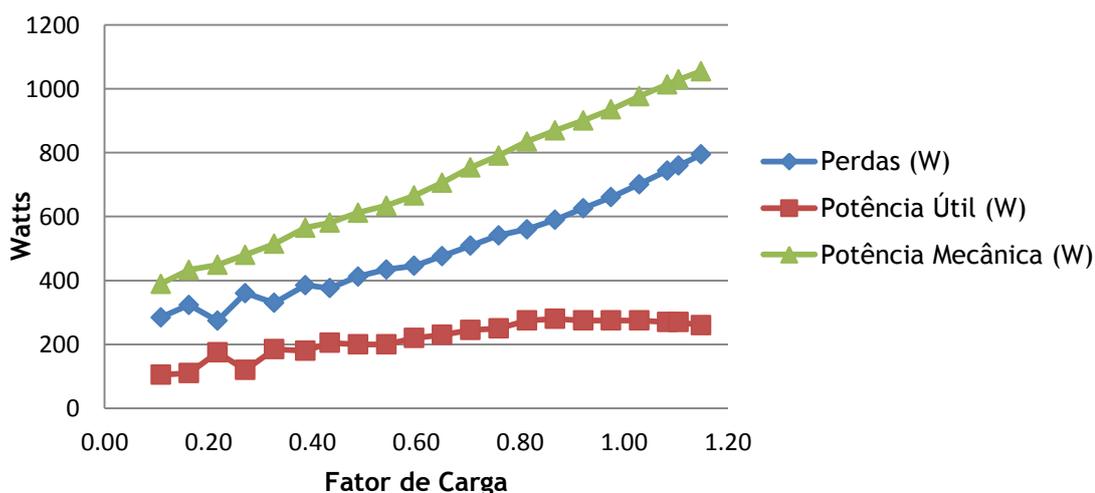


Figura 5.21: Comportamento das potências e das perdas com alteração do fator de carga.

Uma vez que se trata de uma carga indutiva, o gerador irá fornecer menos potência ativa, sendo parte desta substituída por potência reativa, como observado no gráfico acima.

Deste modo os valores do rendimento irão ser menores, uma vez que a sua potência útil será menor. Conseqüentemente, à medida que a carga aumenta o valor do rendimento diminui.

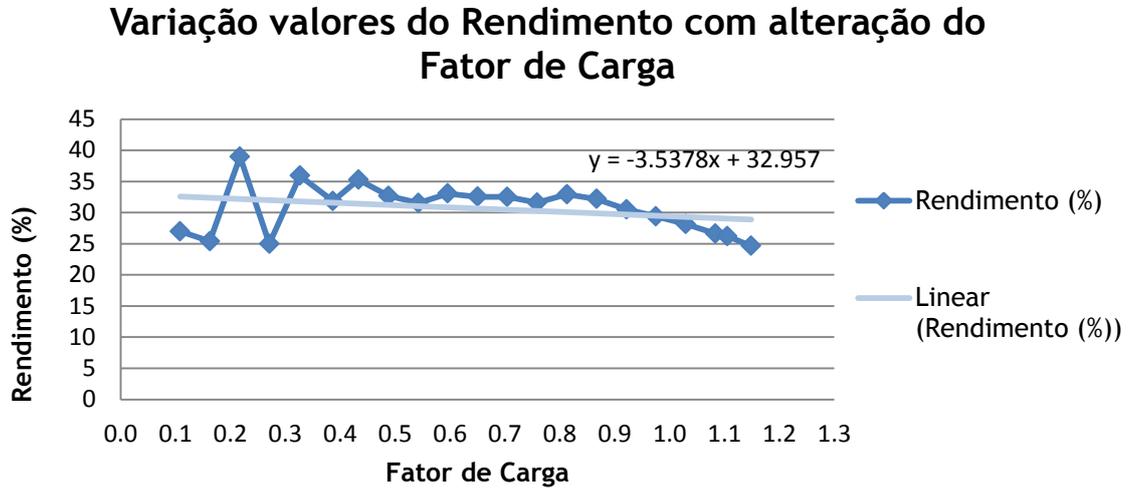


Figura 5.22: Valores obtidos para o rendimento com a alteração do fator de carga.

Concluída a realização deste ensaio, foi analisado o comportamento da temperatura, sendo que é verificado um pequeno aumento:

$$R_{med} = \frac{1.32+1.31+1.31}{6} = 0.6567 \Omega \quad (5.23)$$

Deste modo, a temperatura final de funcionamento é de:

$$0.6567 = \frac{(235+T)}{(235+18)} \times 0.5855 \rightarrow T = 48.76 \text{ Graus Celsius.} \quad (5.24)$$

A máquina aqueceu 1 °C, alimentando uma carga indutiva.

5.3.5.3 - Ensaio com o gerador funcionando em modo isolado com carga capacitiva

A realização deste ensaio envolveu a utilização de 2 cargas capacitivas reguláveis dispostas paralelamente de 4 KVar cada.

À semelhança do ensaio descrito no tópico anterior, neste também existirá circulação de energia reativa, a diferença é que esta parte da carga e circulará para o gerador. A velocidade de funcionamento do gerador foi constante e igual a 1500 r/min.

O esquema utilizado é idêntico ao utilizado nos ensaios anteriores, diferenciando apenas o tipo de carga.

As cargas capacitivas armazenam energia no seu campo elétrico e devolvem-na totalmente ao gerador, não exercendo também, como nas cargas indutivas, nenhum binário resistivo sobre o rotor. Se houvesse corrente de excitação, de forma a manter a tensão no valor nominal, seria necessário reduzir esta corrente devido ao efeito magnetizador da carga.

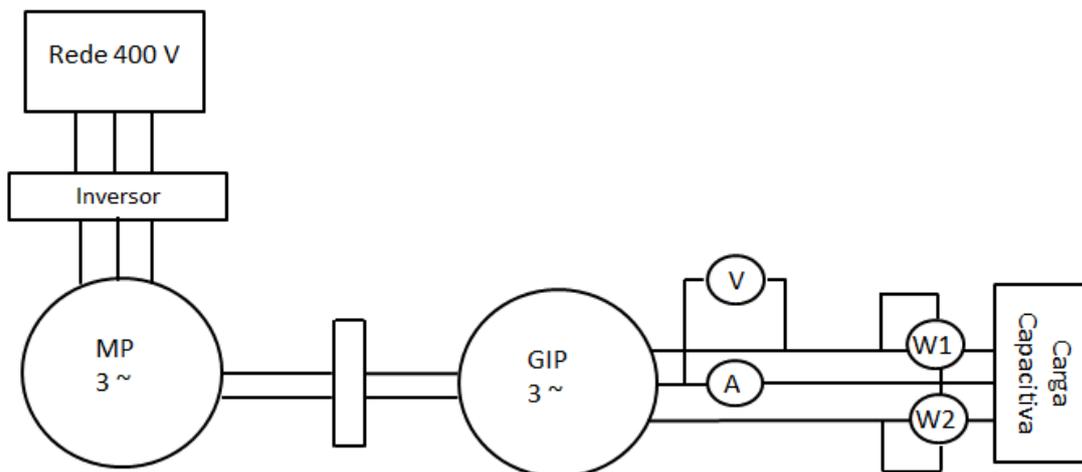


Figura 5.23: Esquema utilizado para o ensaio com carga capacitiva.

Os valores obtidos neste ensaio, à semelhança dos outros, estão representados no anexo.

Realizada a montagem, foram registados os diferentes valores medidos para os diversos valores de fator de carga, sendo o fator de carga definido pela divisão da corrente obtida pelo valor da corrente nominal, 9.23 A. Uma vez que a regulação dos diferentes níveis de carga capacitivas não permitiram uma obtenção exata de valores, não foi possível obter os valores para o funcionamento nominal. No entanto obteve-se um ponto de funcionamento a uma sobrecarga de aproximadamente 36%.

A carga capacitiva apresenta características de funcionamento inversas ao da carga indutiva, sendo um exemplo disso a tensão aos terminais da máquina. Esta na carga indutiva diminui à medida que o fator de carga aumenta, aumentando na carga capacitiva à medida que aumentam os valores do fator de carga. Este facto acontece porque a carga capacitiva fornece potência reativa ao gerador, magnetizando a máquina, o que irá resultar num aumento da força eletromotriz induzida, aumentando a tensão aos seus terminais. É possível verificar esse efeito no gráfico 5.24:

Variação da Tensão com o Fator de Carga

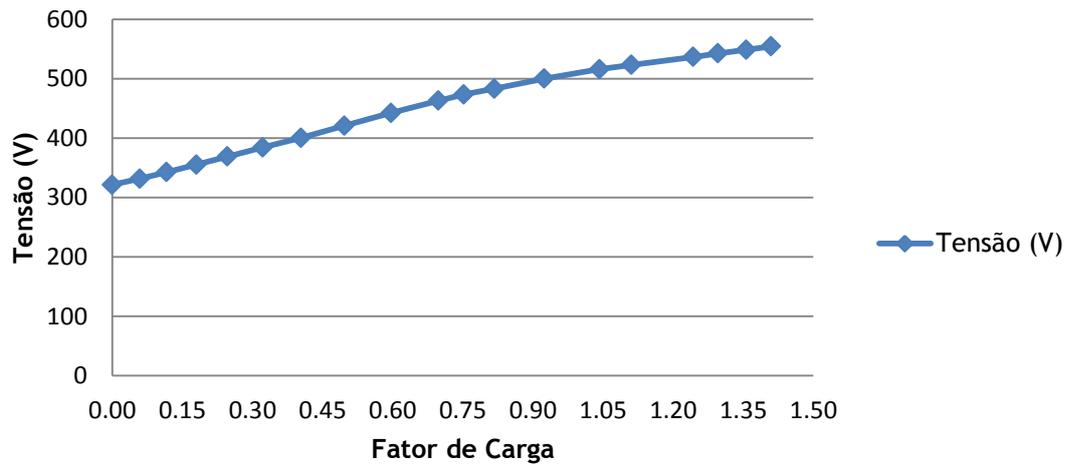


Figura 5.24: Alteração da tensão com o fator de carga no ensaio com carga capacitiva.

A variação da potência reativa fornecida ao gerador irá aumentar à medida que o fator de carga aumenta, uma vez que a tensão também vai crescendo.

Variação da Potência Reativa fornecida ao gerador com o Fator de Carga

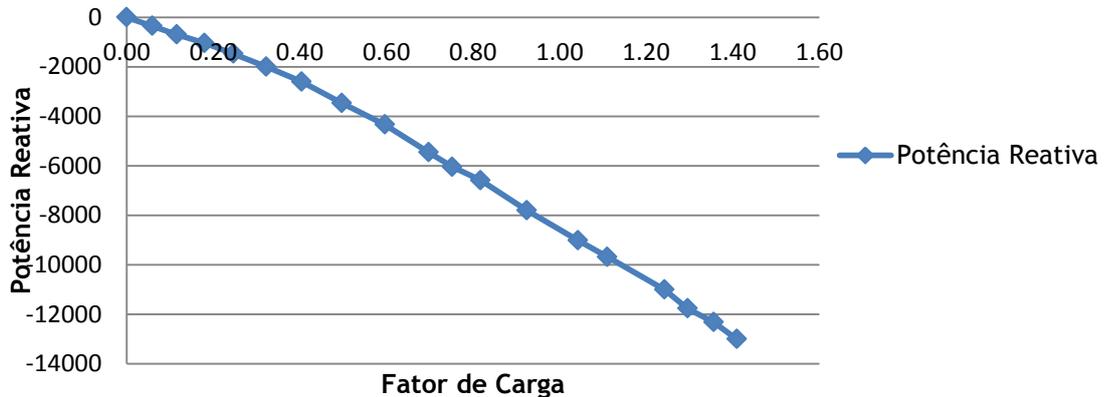


Figura 5.25: Comportamento da potência reativa fornecida ao gerador com o fator de carga.

Numa situação perfeita, a potência ativa fornecida deveria ser nula. No entanto, devido à natureza não ideal das cargas e a imprecisões de erros de leitura, não se verifica essa uniformidade geral nos resultados.

Daqui resulta que o fator de potência e o rendimento apresentam também valores nulos, com exceção das situações em que a potência ativa é diferente de zero. A potência mecânica nesta situação é toda ela dissipada sob a forma de perdas. É possível verificar os resultados obtidos nos seguintes gráficos.

Variação das Potências e das Perdas com alteração do Fator de Carga

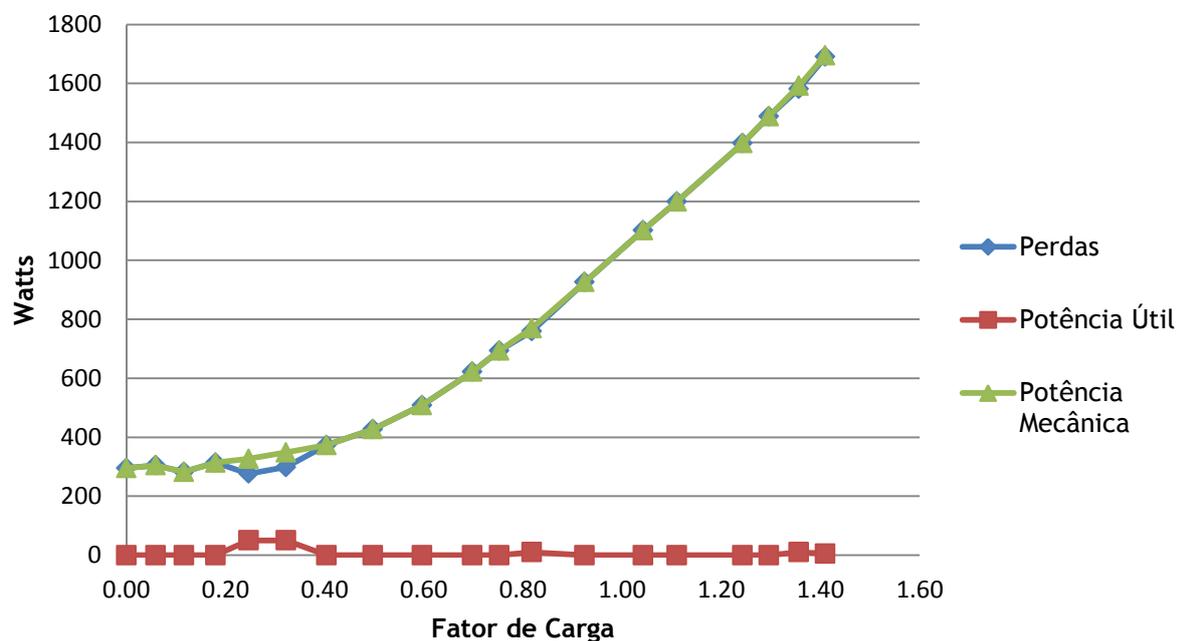


Figura 5.26: Comportamento dos valores das potências e das perdas com a alteração do fator de carga.

Variação do Fator de Potência com o Fator de Carga

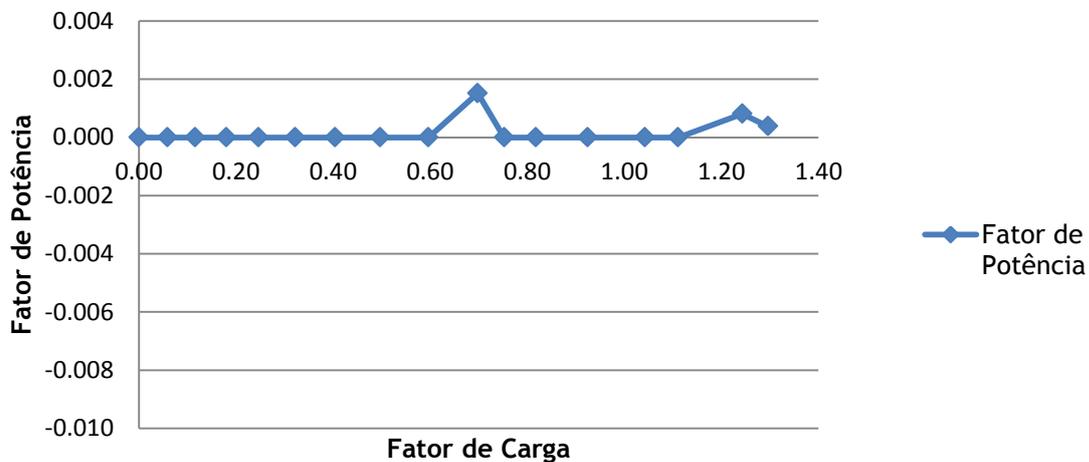


Figura 5.27: Comportamento do fator de potência com alteração do fator de carga.

Variação do Rendimento com o Fator de Carga

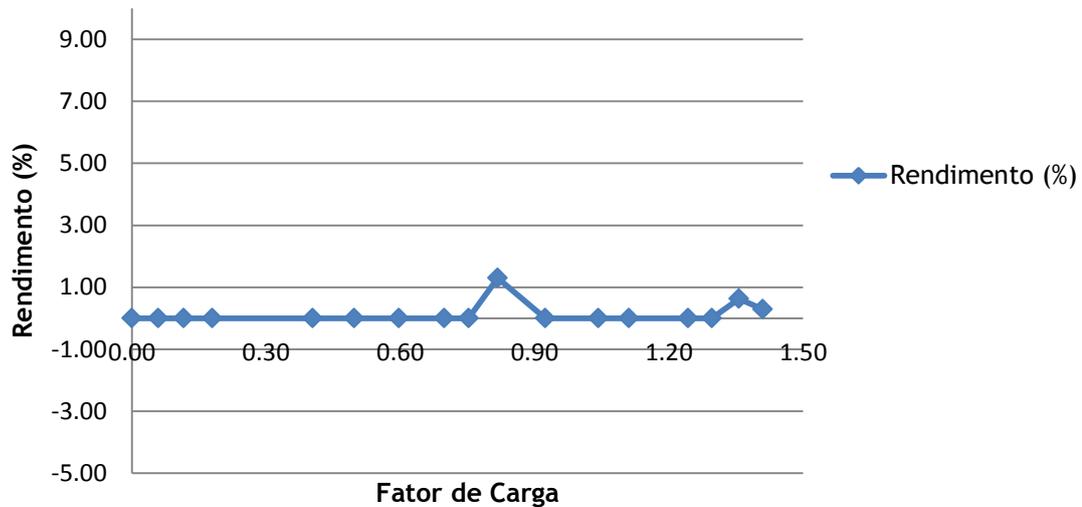


Figura 5.28: Valores do rendimento obtidos para o ensaio com carga capacitiva.

O resultado da resistência estatória após um funcionamento prolongado da máquina com algumas interrupções ao nível da alteração do tipo de carga, sendo a carga final, uma carga do tipo capacitiva é demonstrado a seguir:

$$R_{med} = \frac{1.325+1.325+1.3325}{6} = 0.66375 \quad (5.25)$$

Aplicando o critério de determinação de temperatura, resulta:

$$0.66375 = \frac{235+T}{235+18} \times 0.5855 \quad (5.26)$$

onde,

$$T = 51.812 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.27)$$

Com isto conclui-se que a temperatura aumentou em relação ao funcionamento com o tipo de carga indutiva, pois existe trânsito de potência reativa para o gerador.

5.3.5.4 - Ensaio em funcionamento paralelo à rede

Um sistema elétrico de energia integra várias centrais de geração de energia elétrica em paralelo. Em cada central é ocorrente existirem diversos geradores a operar em paralelo.

São numerosas as vantagens na subdivisão de um sistema elétrico em várias centrais de menores dimensões, tanto do ponto de vista económico, como do ponto de vista estratégico. Estas vantagens aplicam-se também à utilização de diversas unidades de geração menores (geradores), em substituição de uma máquina maior, abrindo caminho à produção dispersa de energia elétrica aproveitando fontes de energia renováveis.

As principais vantagens de geradores em paralelo são:

- Se um único gerador de grande potência constitui uma central geradora e por alguma razão deixar de funcionar, deixará de funcionar também a central de

geração, enquanto que se a central for constituída por vários geradores com menor potência e um deles necessitar de reparação, é possível garantir a continuidade de serviço através dos outros;

- De modo a que uma central com um único gerador funcione ao máximo rendimento, este terá de ser alimentado à sua velocidade nominal. Torna-se antieconómico ser um único gerador a operar se as cargas a serem alimentadas são pequenas. Optando por uma operação com vários geradores dispostos paralelamente, e de modo a atender à necessidade de carga, é possível adicionar ou remover geradores de funcionamento, sendo que cada um pode ser operado nos seus valores nominais, funcionando a central ao máximo rendimento;
- Em caso de necessidade de reparo e manutenção, é mais fácil operar geradores dispostos paralelamente do que um só de maior potência, do ponto de vista de peças de reposição ou reserva, bem como dos serviços a executar;
- Quando aumentar a carga, são instaladas unidades adicionais para acompanhar o acréscimo;
- Existem limitações físicas e económicas para a capacidade possível de uma única máquina. A utilização de geradores a operarem em paralelo aumenta a potência disponível.

É necessário aplicar cuidados especiais na ligação do gerador à rede elétrica antes do momento de ligação. Existe um conjunto de igualdades a ser cumpridas por parte dos dois sistemas trifásicos, chamadas condições de sincronismo, sendo elas:

- Igualdade da ordem de sucessão de fases de cada um dos sistemas trifásicos de tensão;
- Igualdade de fase dos dois sistemas de tensão;
- Igualdade da amplitude das tensões nos terminais de ligação;
- Igualdade de frequência das grandezas dos dois sistemas de tensão.

Quando forem atingidas estas condições, os dois geradores funcionarão em sincronismo.

Ligando-se geradores em paralelo, a distribuição da potência ativa depende da rotação da máquina primária, enquanto que a distribuição da potência reativa depende da excitação do campo de cada gerador.

A máquina primária mostra uma tendência de queda na rotação com o aumento da potência ativa (carga). Isto é necessário para ser possível obter uma distribuição estável da potência ativa.

Para tal, o esquema de montagem utilizado foi o seguinte:

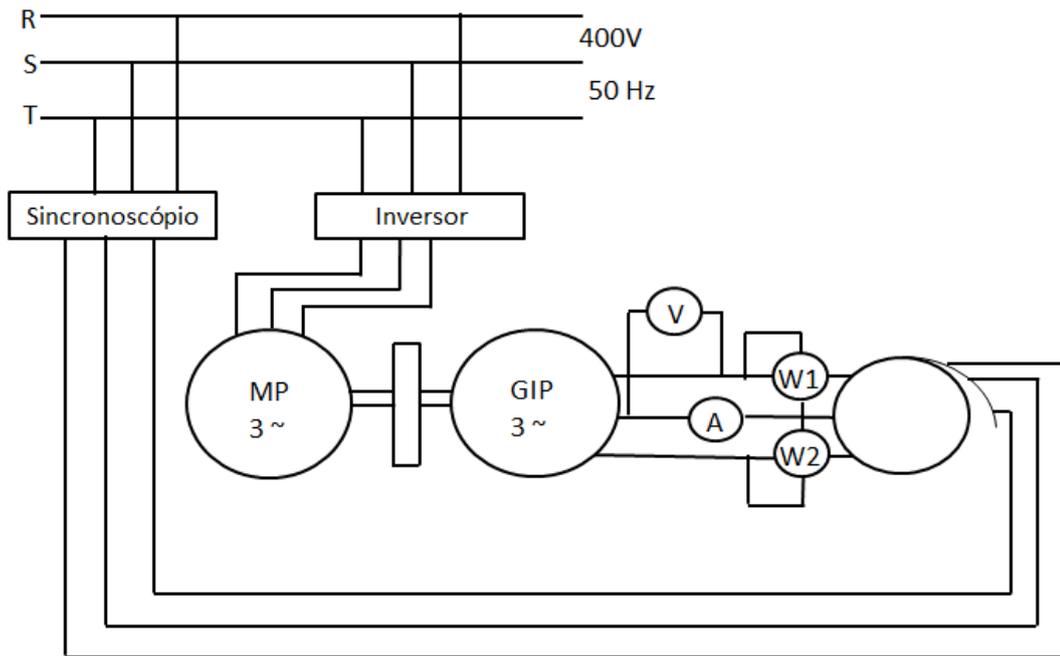


Figura 5.29: Esquema de montagem do ensaio paralelo à rede.

Como dito, é necessário garantir que o gerador apresente a mesma sequência de fases da rede, a mesma tensão entre fases (no nosso caso, aproximadamente 400 V), e a mesma frequência, sendo esta imposta à velocidade de rotação, por sua vez acoplada pelo variador eletrônico de velocidade (50Hz).

Funcionando em vazio, o gerador apresentava uma tensão de 335.7, sendo necessário recorrer ao autotransformador de modo a elevar este valor de tensão para 405.3, o valor de tensão medido da rede. De forma a obedecer à sequência de fases, utilizou-se um sincronoscópio, um aparelho que liga lâmpadas entre fases homólogas e indica o momento em que os dois sistemas apresentam a mesma sequência de fases e a sua diferença da tensão é nula, sendo este o momento ideal para conectar o gerador em paralelo com a rede.

A realização deste ensaio laboratorial contou com a seguinte lista de material:

- Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes;
- Máquina Primária (Máquina de Indução);
- Sensor de Binário;
- Multímetro;
- Voltímetro;
- Amperímetro;
- Dois Wattímetros;
- Taquímetro;
- Autotransformador;
- Placa de terminais;
- Sincronoscópio;
- Variador de velocidade;
- Cabos de ligação.

Para se conseguir controlar a potência entregue pelo gerador de ímanes permanentes à rede, nesta série de ensaios optou-se por trocar a máquina primária por um motor de indução trifásico com as seguintes características:

Tabela 5.6: Características da máquina primária utilizada.

Caraterísticas da máquina primária	
Tipo	Weg BM53734
Tensão Nominal	400/690 V
Corrente Nominal	10.4/6.03 A
Potência	5.5 kW
Cos ϕ	0.85 i
Frequência	50 Hz
Velocidade Nominal	1465 rpm
Rendimento	89.5%
Classe Isolamento	F

No funcionamento do gerador de ímanes permanentes em paralelo com a rede foram alterados os valores de frequência do variador eletrónico de velocidade, condição que implica diretamente alteração do fator de carga, pois é alterada a velocidade. A máquina primária foi levada à sobrecarga e obtiveram-se diferentes valores mediante o fator de carga. Os gráficos das características estão representados abaixo. À semelhança dos casos anteriores, optou-se por reunir os valores numéricos em anexo.

Variação da Potência Ativa com o Fator de Carga

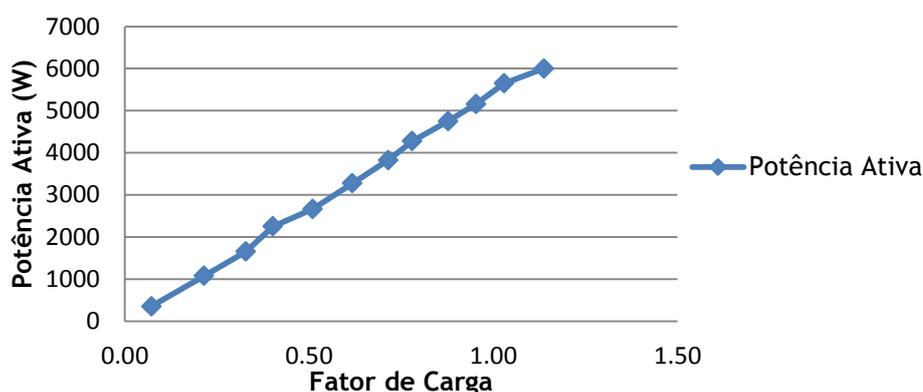


Figura 5.30: Gráfico que representa a variação da potência ativa com o fator de carga.

A variação da potência ativa produzida pelo gerador foi conseguida através da regulação da frequência de alimentação do motor de indução trifásico, crescendo aquela com o crescimento desta.

Observando o gráfico acima obtido, é verificado um aumento da potência ativa à medida que crescem os valores da frequência, e, com isso, o fator de carga. Este facto ocorre devido ao aumento da velocidade da máquina primária, que ao elevar os valores do fator de carga, a potência mecânica produzida pela máquina primária aumentará, levando ao aumento da potência ativa.

A máquina está a fornecer à rede energia reativa a partir de um fator de carga de cerca de 0.20, até 0.95, e a consumir para valores inferiores a 0.20 e superiores a 0.95. Quando o gerador atinge a plena carga e posteriormente entra em sobrecarga, necessita de energia reativa para compensar o funcionamento e manter o seu campo magnético indutor, assim como para fatores de carga muito baixos (abaixo de 0.2). No funcionamento num fator de carga de 0.20 a 1, a excitação da máquina é garantida pelos próprios imanes permanentes. A este propósito, observa-se o gráfico que ilustra o comportamento da potência reativa representado abaixo. Uma importante consideração prende-se com o facto de que, ao contrário do gerador síncrono de rotor cilíndrico, o campo magnético fornecido pelos ímanes não é controlável, não sendo possível regular a tensão e a potência reativa. Em sistemas conectados à rede com velocidade variável, isto normalmente não é um problema uma vez que o conversor conectado à rede controla a tensão de saída e o fator de potência.

Comportamento da Potência Reativa com alteração dos valores do Fator de Carga

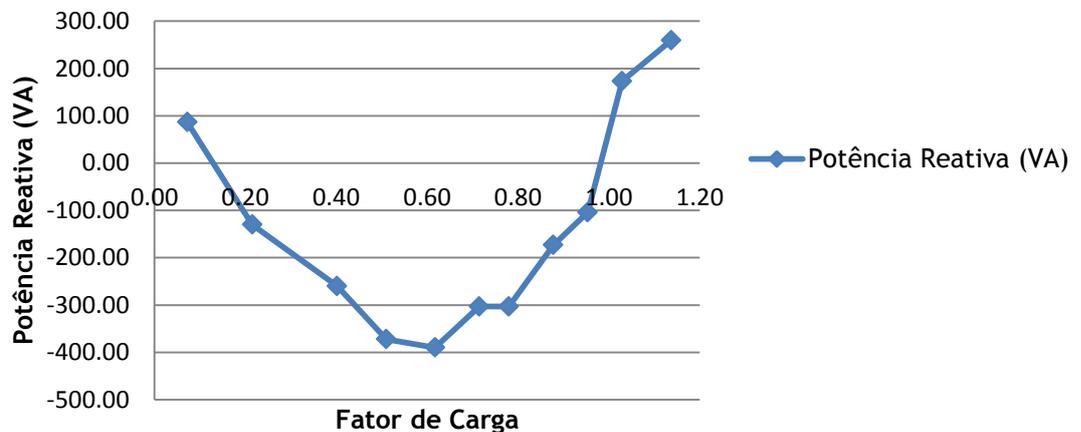


Figura 5.31: Gráfico que ilustra o comportamento da potência reativa com alteração do fator de carga.

Variação das Potências e das Perdas com alteração do Fator de Carga

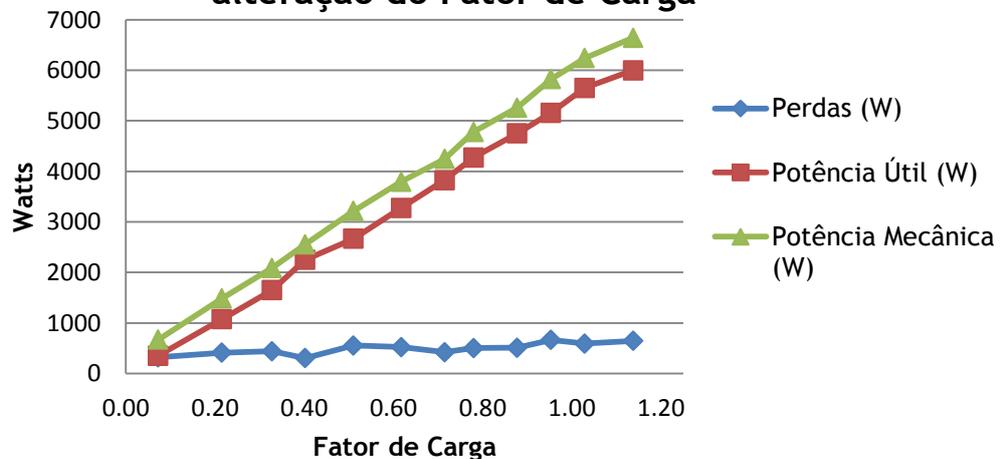


Figura 5.32: Gráfico que ilustra o comportamento da potência e das perdas com alteração do fator de carga.

Como citado anteriormente, o aumento da potência mecânica provocará um aumento da potência útil gerada pelo gerador. Aliás, a menos das perdas no gerador, toda a potência que lhe é fornecida pela máquina primária é transformada em potência (ativa) elétrica que este transfere para a rede elétrica.

Um dos benefícios do gerador de ímanes permanentes é a sua capacidade de autoexcitação, não necessitando de um circuito de excitação DC adicional, como as máquinas síncronas. A ausência de enrolamentos do rotor causa a eliminação de perdas nesta parte da máquina. Também, a ausência de escovas e anéis deslizantes são fatores para uma baixa manutenção. Um aspeto positivo derivado dos geradores síncronos é a não necessidade de inclusão de condensadores para a manutenção do fator de potência, ao contrário do que é exigido em geradores de indução.

A elevada eficiência deste, tem como peça fundamental estas afirmações, traduzindo-se na existência de reduzidas perdas (entre 320 e 645 Watt), concluindo-se que devido a características como existência de baixa manutenção, reduzidas perdas, e elevado rendimento, seja uma peça fundamental para a produção de energia Offshore, quer em aplicações aquáticas e subaquáticas, ou através da força do vento.

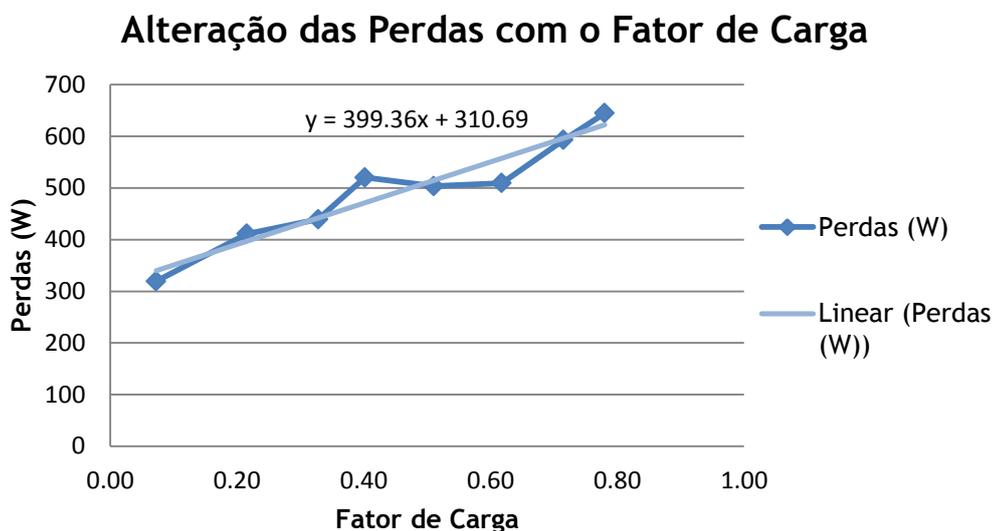


Figura 5.33: Comportamento das perdas mediante alteração do fator de carga.

Este tipo de gerador pode operar a diferentes velocidades, obtendo de igual modo elevados rendimentos, sendo perfeitamente adaptáveis a qualquer tipo de energia renovável. Com isto, surgem geradores implementados para operarem a baixas rotações por minuto e outros para altas. Por exemplo, as turbinas eólicas com acionamento direto requerem muito baixas rotações por minuto. Contudo, à medida que se implementam geradores para operarem a baixas velocidades, o preço aumenta, assim como se a velocidade é menor, o gerador fica fisicamente maior em tamanho, pois a redução de velocidade aumenta o consumo de material do gerador, como referido no capítulo 3.

Um possível travão à utilização do gerador de ímanes permanentes em aproveitamentos renováveis de grandes potências é precisamente o custo de material, no entanto este investimento pode ser compensado com a maior quantidade de energia produzida face aos geradores convencionais.

Estes geradores apresentam algumas das principais vantagens que os diferenciam dos usuais utilizados. Apesar de serem bastantes seguros e com uma operação confiável, com poucas ou nenhuma falhas, podem facilmente adaptarem-se em todo o tipo de ambientes. [62]

São completamente resistentes aos diferentes estados de tempo, apresentando uma enorme flexibilidade de adaptação, desde à água ao vento tendo o seu material uma duração média de 25 anos de operação. [63]

Contudo, a vantagem que salta mais à vista, corresponde aos altos valores de rendimento, confirmados experimentalmente no gráfico abaixo.

Neste ensaio foram obtidos valores de rendimento bastante elevados, em torno dos 90%, provando a vantagem que os ímanes permanentes apresentam ao anularem as perdas no rotor, e a rentável produção de energia renovável que outros geradores não conseguem obter.

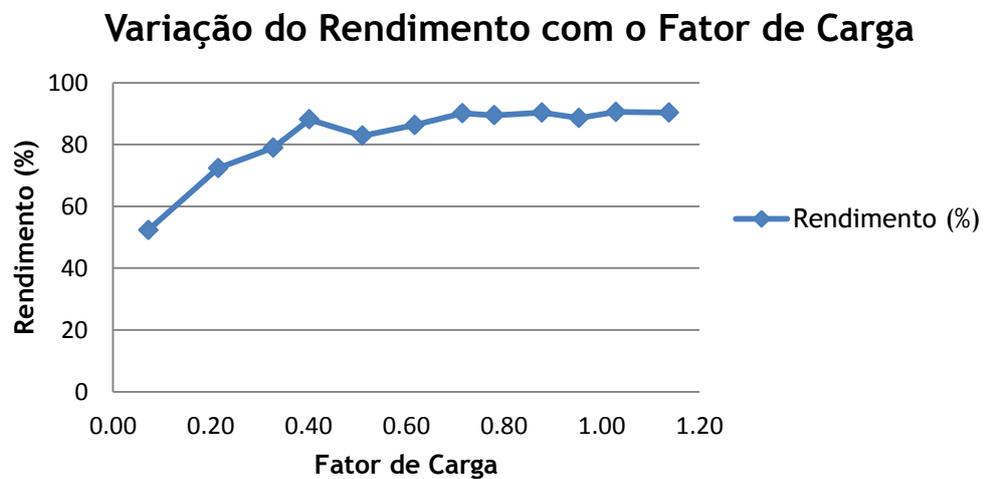


Figura 5.34: Gráfico que ilustra os valores de rendimento obtidos.

Com o aumento do custo de energia elétrica e um ambiente poluído, mais e mais pessoas procuram por fontes de geração de eletricidade alternativas, onde os geradores síncronos de ímanes permanentes se encaixam perfeitamente. Estes não utilizam fontes não-renováveis de energia para a produção de eletricidade quando combinada com fontes renováveis, nem originam material nocivo para o ambiente e solo terrestre, conseqüente da sua utilização para a produção de energia elétrica.

Alguns especialistas recomendam o uso de geradores de ímanes permanentes, uma vez que estes conseguem reduzir o impacto de poluição em até 50%. [64]

A transmissão da energia do gerador para a rede dependerá do fator de potência desta. Na ligação do gerador em paralelo com a rede foram obtidos fatores de potência bastante satisfatórios, muito próximos do valor unitário. O gráfico representado abaixo ilustra os diversos valores obtidos para o fator de potência na realização do ensaio, mostrando que, praticamente toda a energia produzida pelo gerador neste modo de funcionamento foi essencialmente potência ativa, tendo esta sido consumida pela carga (rede), comprovando a importante utilidade deste gerador como fonte de produção de energia renovável.

Contudo é possível observar uma tendência no gráfico, que informa que para valores de fator de carga elevados, o fator de potência anda muito próximo da unidade, e para fatores de carga reduzidos, este valor é mais baixo.

Alteração dos valores do Fator de Potência com variação do Fator de Carga

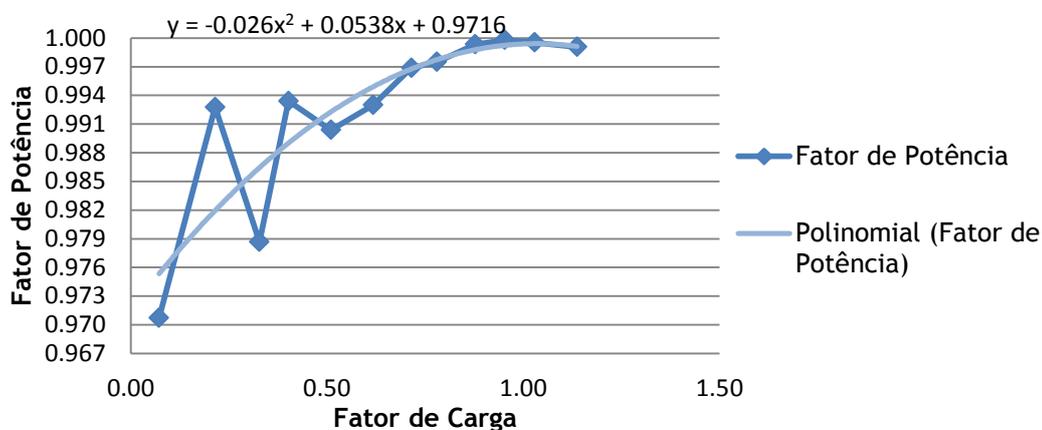


Figura 5.35: Comportamento do fator de potência com variação do fator de carga.

Como é implícito, uma vez que é aumentado o valor da frequência no variador eletrónico de velocidade, maior será a corrente a circular da máquina primária para o gerador. A tensão aos terminais deste irá sofrer ligeiros aumentos devido à presença desta corrente e do funcionamento em modo elevador do autotransformador.

Variação do valor da Tensão aos terminais do gerador com alteração do Fator de Carga

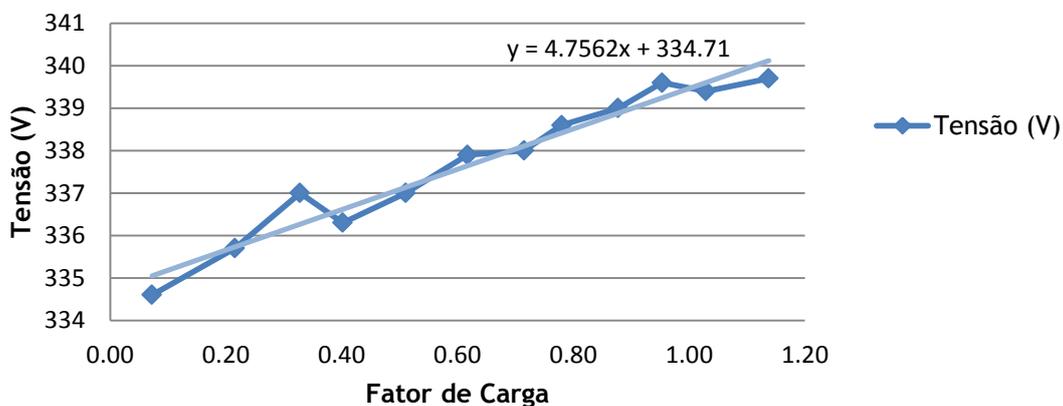


Figura 5.36: Comportamento da tensão aos terminais do gerador mediante alteração do fator de carga.

5.4 - Sínteses e Conclusões

A realização dos ensaios permitiu estudar ao pormenor o comportamento das características de um gerador de ímanes permanentes quando este funciona como gerador isolado e ligado à rede, em regime permanente.

No funcionamento do gerador a operar isoladamente foram utilizadas 3 tipos de cargas: resistiva, indutiva e capacitiva.

Em sequência do estudo realizado, conclui-se que a tensão de saída no gerador depende do tipo de carga que alimenta, revelando comportamentos diferentes. Na carga resistiva foi possível observar o efeito da anisotropia inversa aos terminais do gerador, permitindo executar um melhor controlo desta aos seus terminais caso a razão de anisotropia seja elevada, mantendo a tensão praticamente constante, compensando a ausência de um sistema de excitação clássico, enquanto que na carga indutiva a tensão cai bastante e na carga capacitiva sobe. No ensaio paralelo com a rede a tensão aos terminais do gerador sobe ligeiramente devido à utilização do autotransformador.

Conclui-se que a utilização do gerador de ímanes permanentes tanto em sistemas isolados como ligados em paralelo à rede é uma excelente alternativa devido às características de funcionamento apresentadas serem melhores face às máquinas convencionais, chegando a atingir elevados valores de rendimento com valores de perdas muito reduzidas.

Quando o gerador de ímanes permanentes está ligado em paralelo com a rede, a velocidade é determinada pela frequência desta e é constante. Em casos de alteração de binário (como por exemplo um golpe súbito de vento), o gerador produzirá uma força eletromagnética que irá oferecer resistência ao aumento de velocidade, originando elevadas tensões aos seus terminais. Em comparação com um gerador de indução, este permite uma ligeira mudança de velocidade em função do binário motor, contudo, os geradores de ímanes permanentes apresentam uma maior eficiência.

A principal desvantagem deste tipo de gerador é o risco de desmagnetização dos ímanes causado por diversos fatores, como a presença elevadas temperaturas de funcionamento e elevadas correntes. É difícil chegar à temperatura de Curie (temperatura de desmagnetização do íman, onde este perde o seu campo magnético). Caso não se atinja essa temperatura, o campo magnético é regenerado, assim que a temperatura baixe.

Nos ensaios realizados não se verificaram problemas deste tipo, tendo sido testadas e reconhecidas as suas capacidades de utilização na produção de energia renovável a partir de fontes alternativas, verificando-se que esses problemas podem ser ultrapassados e não serem necessariamente uma barreira.

O principal obstáculo para a transição para este tipo de tecnologia tem a ver com a incerteza por parte de algumas companhias sobre os custos do ciclo de vida deste gerador e a possível manutenção complicada, como a substituição dos seus rolamentos para potências maiores. Para além disso, a criação de conversores de eletrónica de potência para gamas bastante elevadas torna-se um obstáculo, uma vez que estes são dimensionados para a saída nominal total, o que significa, inevitavelmente, mais tamanho / peso / custo.

Analisando todos os factos, conclui-se que é de grande importância e utilidade o uso de geradores de ímanes permanentes em aproveitamentos de energia renovável, uma vez que para além de todas as características até aqui citadas, o preço dos ímanes de terras raras desceu em grande magnitude nos últimos anos, sendo uma oportunidade de investimento pela

energia extra que este tipo de gerador oferecerá em comparação com os geradores convencionais com rendimento menor e com características não tão favoráveis.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 - Síntese e conclusões

Numa primeira parte do trabalho foram analisados e enfatizados alguns aspetos ligados aos aproveitamentos de energias renováveis, nomeadamente o seu cenário energético em Portugal e global, assim como políticas energéticas adotadas. Esta caracterização geral face ao estado do mercado permitiu focar determinadas características de fontes de energia ainda em desenvolvimento e não tão exploradas, como oportunidades futuras para a redução do consumo energético global baseado em combustíveis fósseis. Evidenciou também a necessidade de alargar o leque de escolhas e de se melhorarem e amadurecerem soluções e tecnologias específicas, estando os geradores de ímanes permanentes na vanguarda face aos restantes geradores utilizados para a produção de energia de origem renovável.

Como é previsível, a escolha de um gerador a implementar suscita receios e inseguranças mediante as características específicas do mesmo e da turbina, uma vez que este grupo deverá funcionar em perfeita simbiose e apresentar um bom rendimento, uma boa velocidade nominal de funcionamento. A variabilidade das características da fonte primária das diferentes energias renováveis permitiu que existisse uma evolução no desenvolvimento da tecnologia, de forma a elevar as possibilidades da extração de energia elétrica a um custo mais baixo. Estudados os fundamentos e documentação sobre geradores síncronos de ímanes permanentes, conclui-se que é cada vez maior a aplicação destes em sistemas de conversão de energia elétrica, devido às suas vantagens comparativamente às soluções tradicionais. Revelam-se, muitas das vezes, uma alternativa aos sistemas sem caixa de velocidades do gerador de indução (mini-hídricas, por exemplo), apresentando uma manutenção reduzida e elevada fiabilidade. Se construídos com maior número de polos, podem também ser empregues com vantagem em aplicações de baixa velocidade (eólica, etc.), por se poder eliminar a caixa de velocidades ou se poder baixar significativamente a respetiva relação de engrenagens.

Para além das já habituais utilizações nos aproveitamentos eólicos, hídricos e de força maremotriz, de energia térmica e na cogeração, este tipo de máquinas serão utilizadas em crescente número no futuro sob a forma de geradores de média potência a operarem a velocidades variadas. As diversas vantagens que evidenciam, como os melhores rendimentos energéticos e as soluções construtivas mais compactas, baratas e robustas, exigindo baixa

manutenção, tornam este tipo de geradores especialmente adaptados para uma utilização em todos os tipos de aproveitamentos, incluindo aplicações offshore e submersas.

Numa segunda parte do trabalho estudaram-se os aspetos construtivos e características de funcionamento da máquina síncrona de ímanes permanentes a funcionar como gerador. Foi dada particular relevância aos principais aspetos construtivos deste tipo de máquinas, assim como à influência dos ímanes permanentes no seu funcionamento. Concluiu-se que, de entre todos os diferentes tipos de ímanes permanentes existentes no mercado, as ligas de terras raras de Neodímio, Ferro e Boro são as que apresentam maior potencial ao nível de preço, abundância de recursos e características magnéticas, permitindo criar máquinas de ímanes permanentes com elevados produtos energéticos e baixos preços.

Foi analisada a vantagem da anisotropia inversa neste tipo de máquinas, assim como esta também é demonstrada pelos resultados obtidos experimentalmente, permitindo concluir que os ímanes quando inseridos no rotor devem ser projetados de modo a que a sua anisotropia inversa seja maximizada, isto é, a presença dos ímanes permanentes implica a existência de uma elevada força magnetomotriz coerciva, para além de que torna a reactância síncrona longitudinal menor que a transversal, permitindo que a máquina atinja elevadas potências, e apresente uma influência positiva na regulação de tensão e no fator de potência da máquina. Se a razão de anisotropia for suficientemente elevada é possível obter uma boa capacidade de regulação, compensando a ausência de um sistema indutor clássico.

Existe uma penetração gradual da máquina de ímanes permanentes nas diferentes tecnologias renováveis, sendo que, para aproveitamentos de maior potência, ainda existe relutância e incertezas na sua aposta por parte de investidores. O principal obstáculo para a transição para este tipo de tecnologia nos aproveitamentos de maior potência tem a ver com a incerteza por parte de algumas companhias sobre os custos do ciclo de vida deste gerador e a possível manutenção complicada, como a substituição dos seus rolamentos para potências maiores, e controlo. Para além disso, a criação de conversores de eletrónica de potência para gamas bastante elevadas torna-se um obstáculo, uma vez que estes são dimensionados para a saída nominal total, estando a maioria destes configurados para o gerador de indução duplamente alimentado.

Contudo, é possível afirmar que os geradores que operam a uma velocidade fixa estão progressivamente a ser substituídos por geradores síncronos de ímanes permanentes, tecnologia que permite existência de eficiência energética e funcionamento a velocidade variável.

A experiência laboratorial desenvolvida permitiu caracterizar o funcionamento da máquina síncrona de ímanes permanentes a operar como gerador elétrico, confrontando os resultados obtidos experimentalmente com os teoricamente esperados. Foram obtidas diferentes curvas características de funcionamento em regime isolado e em paralelo com a rede.

No funcionamento do gerador isoladamente, foram utilizadas cargas resistivas, capacitivas e indutivas. Com carga óhmica, o valor da tensão aos terminais do gerador em função do fator de carga varia moderadamente, criando a conhecida curva que demonstra o efeito da anisotropia inversa, enquanto na carga indutiva a tensão cai e na carga capacitiva a tensão sobe. É provado assim que, alimentando uma carga resistiva, este tipo de máquinas pode apresentar um funcionamento satisfatório, com rendimento e quedas de tensão em carga moderadas devido ao efeito compensador provocado pela anisotropia inversa, caso esteja presente. Conclui-se que a utilização do gerador de ímanes permanentes em sistemas isolados pode ser uma boa alternativa, sem prejuízo de um esforço continuado para a

melhoria das suas características de funcionamento e para a necessidade de se adotarem estratégias de compensação do fator de potência.

No ensaio do gerador síncrono de ímanes permanentes em paralelo com a rede, a velocidade é determinada pela frequência desta e é constante. Os resultados experimentais que se obtiveram demonstraram as boas características da máquina testada e a viabilidade do seu uso em aproveitamentos de energias renováveis. Comparativamente com os geradores de indução, os quais permitem uma ligeira mudança de velocidade em função do binário motor, os geradores de ímanes permanentes podem apresentar rendimentos mais elevados, sendo compensatória a sua utilização. A possibilidade de se construírem máquinas com elevado número de polos, vocaciona-as também para aplicações de baixas velocidades sem necessidade de se recorrer à caixa de velocidades, sempre exigida quando se usam geradores de indução.

Conclui-se que a utilização do gerador de ímanes permanentes tanto em sistemas isolados como ligados em paralelo à rede é uma excelente alternativa devido às características de funcionamento apresentadas serem melhores face às máquinas convencionais, chegando a atingir elevados valores de rendimento com valores de perdas muito reduzidas.

Atualmente existe uma contínua melhoria e investigação sobre as diferentes características dos geradores de ímanes permanentes, sendo estes os que oferecem mais vantagens comparativamente com as outras máquinas, adequando-se a todos os tipos de energias renováveis, e a uma constante mudança de paradigmas energéticos.

6.2 - Perspetivas de trabalho futuro

A realização da dissertação permitiu identificar várias oportunidades para continuação deste trabalho e para o seu desenvolvimento e aperfeiçoamento futuros. E, atendendo a que numa parte importante deste projeto se optou por uma abordagem experimental, de ensaio laboratorial onde existem sempre dificuldades e limitações, e de obtenção pela via direta de características de uma máquina na perspetiva da sua comparação com as de outras máquinas concorrentes que não foram testadas, destacamos, antes de mais, duas oportunidades de progresso do trabalho que, seguindo essa mesma abordagem, o permitem aprofundar e diversificar:

- Execução de um estudo laboratorial visando caracterizar e comparar as curvas de funcionamento de máquinas assíncronas, síncronas convencionais e síncronas de ímanes permanentes equivalentes, operando como geradores, em funcionamento ligado à rede e em funcionamento isolado, com vista ao aprofundamento prático das vantagens e desvantagens existentes entre umas e outras, para além do alcançado neste trabalho;
- Continuação do estudo sobre a máquina síncrona de ímanes permanentes usada com vista à validação de um modelo físico-matemático para a mesma e à determinação experimental dos respetivos parâmetros, como forma de se caracterizar adicionalmente a anisotropia inversa evidenciada e as suas consequências para o seu funcionamento como gerador.

Noutra perspetiva, pensamos existir espaço também para um trabalho complementar que explore a ligação do gerador de ímanes permanentes à rede através de um conversor eletrónico de frequência e, em particular, as suas aptidões para regimes de velocidade variável em contexto real.

Referências

[1] WWF, “Alterações Climáticas”, Disponível em:

http://www.wwf.pt/o_nosso_planeta/alteracoes_climaticas/, Acesso em: 13/02/2013.

[2] International Energy Agency; “Key World Energy Statistics 2009”, OECD/IEA, Paris, França, 2009.

[3] Energias Renováveis, “Biomassa e Energias Renováveis na Agricultura, Pescas e Florestas (Ponto da situação, Junho de 2005)”, Disponível em:

http://www.energiasrenovaveis.com/images/upload/RELATORIO_BIOMASSA.pdf, Acesso em: 05/03/2013.

[4] Brown, D.W.; Duchane, D.V.; “Scientific progress on the Fenton Hill HDR project since 1983”, Geothermics, 1999.

[5] Aproveitar a energia, “Energia Geotérmica em Portugal”, Disponível em:

<http://www.aproveitarenergia.no.sapo.pt/em%20portugal.htm>, Acesso em: 14/02/2013.

[6] Energia Geotérmica, “Aproveitamentos Geotérmicos nos Açores”. Disponível em:

<http://siaram.azores.gov.pt/energia-recursos-hidricos/geotermia/energia-geotermica.pdf>,

Acesso em 14/02/2013.

[7] Notícia de Diário Digital e Agência Lusa, Disponível em:

<http://energiarenovaveis.blogs.sapo.pt/tag/açores>, acesso a 11/06/2013.

[8] Portal das Energias Renováveis, “Energia Geotérmica.”, Disponível em:

http://www.energiasrenovaveis.com/DetailNoticias.asp?ID_conteudo=477&ID_area=4&ID_su_b_area=9, Acesso em: 14/02/2013.

- [9] Ambiente Online, “Uso de biomassa sólida cresce em Portugal”, Disponível em: <http://www.ambienteonline.pt/noticias/detalhes.php?id=12953>, Acesso em:14/02/2013.
- [10] Portal das Energias Renováveis, “Biomassa”, Disponível em: http://www.energiasrenovaveis.com/DetalleConceitos.asp?ID_conteudo=5&ID_area=2&ID_sub_area=3, Acesso em: 15/02/2013.
- [11] Terra Economia, “Hidrogénio no Mundo”, Disponível em: http://not.economia.terra.com.br/noticias/noticia.aspx?idNoticia=201007121927_RED_79149790, acesso a 21/03/2013.
- [12] Sarmiento, António; “Energia das Ondas em Portugal”, Quercus Ambiente, Março/Abril 2012.
- [13] BP, “Hydroelectricity consumption by region”, Disponível em: <http://www.bp.com/sectiongenericarticle800.do?categoryId=9037153&contentId=7068625>, Acesso em: 06/03/2013.
- [14] INAG, “Programa Nacional de Barragens de Elevado Potencial Hidroelétrico”, Disponível em: <http://pnbeph.inag.pt/np4/sobre>, Acesso em: 06/03/2013.
- [15]] Proença, E. ; “A energia solar fotovoltaica em Portugal, Estado-da-Arte e Perspectivas de Desenvolvimento”, Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, Instituto Superior Técnico, Agosto de 2007;
- [16] Pina Martins, António; “Introdução à energia solar fotovoltaica”, Documentação da Unidade Curricular “Energia Eólica e Solar”, 2012/2013.
- [17] Rundle, Jennifer; “The Renewable Energies Unit Activities Report 2005”, Joint Research Centre, European Commission, 2006
- [18] Moura, António Machado; De Almeida, Aníbal Traça; “Política Energética Portuguesa: em busca duma sustentabilidade económica e social” in Renováveis Magazine - 01-01-2012.
- [19] Direção Geral de Energia e Geologia, Estatísticas Rápidas - Novembro 2012.

- [20] Agência Portuguesa do Ambiente, Comité Executivo da Comissão para as Alterações Climáticas; “Avaliação do cumprimento do Protocolo de Quioto”, Maio 2012, Amadora, Portugal.
- [21] International Energy Agency, “World Energy Outlook 2008”, OECD/IEA, Paris, França, 2008.
- [22] Universidade Federal Santa Maria, “Fontes de Energia”, Disponível em: www.ufsm.br/desp/geomar/dau3051/Fontesdeenergia.pdf, Acesso em 12/06/2013.
- [23] Vaz Guedes, Manuel; “O alternador síncrono trifásico nos pequenos aproveitamentos hidroelétricos”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Maio 1994.
- [24] Miranda, Vladimiro; Machado e Moura, António; Matos, Manuel; “Produção de energia”, Documentação da Unidade Curricular “Sistemas Elétricos de Energia”, 2010/2011.
- [25] Cura Martins, José Roberto; Ferreira de Almeida, Tiago André; “Aproveitamentos Hidroelétricos”, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2009.
- [26] Ferreira, José Rui: “Produção Hidroelétrica”, Documentação da Unidade Curricular “Sistemas Elétricos de Energia”, 2008.
- [27] Climate and Fuel, “Potential of Tidal Power Generation”, Disponível em: <http://www.climateandfuel.com/pages/tidal.htm> , Acesso a: 14/03/2013.
- [28] eHow, “Types of Tidal Turbines”, disponível em: http://www.ehow.co.uk/list_7277023_types-tidal-turbines.html, acesso a 24/03/2013.
- [29] Elghali, S.E.B.; Benbouzid, M.E.H.; Charpentier, J.F.; ”Marine Tidal Current Electric Power Generation Technology: State of the Art and Current Status”, IEEE, 2007.
- [30] Instituto Nacional da Propriedade Industrial , “Energia Oceânica”, Disponível em: http://www.marcaspatentes.pt/files/collections/pt_PT/1/300/302/Energia%20Oce%C3%A2nica.pdf, Acesso a 25/03/2013.

[31] Pereira Ribas, Henrique Luís; “Utilização dos Geradores Síncronos em Aproveitamentos de Energias Renováveis”, Tese de Mestrado da Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Fevereiro 2009.

[32] Falcão, António; “ Wave Energy utilization: A review of the technologies.”, Renewable and Sustainable Energy Reviews “ Volume 14, 2010.

[33] Wave Energy, “The technology of wave power”, Disponível em: <http://www.waveenergy.ie/>, Acesso em: 26/03/2013.

[34] Garcia Rosa, Paula Bastos; “Controle e otimização de um sistema de conversão de energia das ondas”, - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil, 2008.

[35] Esteves Coelho, Luís Miguel; “Conversores de acção directa no aproveitamento de energia das ondas”, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.

[36] Polinder, H.; “Conventional and TFPM Linear Generators for Direct-Drive Wave Energy Conversion”, IEEE Transactions, 2005.

[37] Projeto SURGE, disponível em: <http://fp7-surge.com/?page=main&lang=pt>, Acesso a 26/03/2013.

[38] Oliveira Lima, José Alberto: “Gerador de baixa rotação para aproveitamento de energia das ondas”, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa- Lisboa, 2010.

[39] Curso de Especialização em Eficiência Energética - 6ª aula, Energia eólica. Disponível em: http://pessoal.utfpr.edu.br/fatimaraia/arquivos/aula6_C_EOLICA_Parte1_Energias_Renovaveis, Acesso a :10/03/2013.

[40] IWR, “Wind Tech”, Disponível em: http://www.iwr.de/wind/tech/bilder/VERT_ROT.JPG, Acesso a 10/03/2013

[41] Lopes de Andrade, André Bernardo; Martins Lopes, Gabriel; “Biomassa - Planeamento e produção de eletricidade”, Faculdade Ciências e Tecnologia Universidade Coimbra, , 2009.

[42] Portal das energias alternativas - Energia Geotérmica. Disponível em: <http://www.energiasealternativas.com/energia-geotermica.html> acesso a: 20/03/2013

- [43] Martins, Laura de Fátima Ferrão de Paiva; “Pilhas de combustível” - Relatório Técnico, 2000.
- [44] De Brederode, Vasco; Domingues, Frutuoso; E Costa, Penaforte; “Energia Eólica”, Novas Energias, A Escola e a Comunidade, Universidade do Minho, Braga, Fevereiro 1985.
- [45] Oliveira, M. O.; Lima, D. A. C.; Perrone, O. E.; Bretas, A. S.; Orellana Paucar, R. W.; “Geração com Máquinas de Indução: uma contribuição ao estudo de Geradores de Indução”, disponível em: http://www.ceed.org.ar/wp-content/uploads/2012/12/Oliveira_et_al_ISIT2012.pdf, Acesso a 11/03/2013
- [46] Ferreira Ribeiro, Carlos Manuel; “Circuito de Interface para Ligação de um Gerador Eólico à Rede”, Guimarães, 2008
- [47] Ríncos, F.; Carlson, R.; Kuo-Peng, P.; Voltolini, H.; Batistela, N.J.; “GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA - TECNOLOGIAS ATUAIS E FUTURAS”, Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-geracao-de-energia-eolica-tecnologias-atuais-e-futuras-artigo-tecnico-portugues-br.pdf> Acesso a 22/04/2013
- [48] Peças Lopes, João Abel; “Energia Eólica - Tipos de Aerogeradores Modelização, Controlo e Protecções”, 2005/2006. Disponível em: http://paginas.fe.up.pt/~jpl/textos/EE_Tipos_Aerog.pdf Acesso em: 11/03/2013
- [49] Cunha Barros, José Alberto “Cooperação de Fontes de Energia Renovável para Providenciar Serviços de Sistema à Rede Eléctrica de Distribuição”, DEEC - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho de 2007
- [50] Freitas, Walmir; JR, Vieira, José Carlos; França, André Morelato; Da Silva, Luiz Carlos; “Análise comparativa entre geradores síncronos e geradores de indução com rotor tipo gaiola de esquilo para aplicação em geração distribuída”, Revista Controle & Automação/Vol.16 no.3/Julho, Agosto e Setembro 2005.
- [51] Fernandes, Rui Martins; “Controlo de um gerador hidroeléctrico utilizado na recuperação de energia numa conduta de abastecimento de água”, ISEL 2011.
- [52] Castro, R.M.G.; “Introdução à Energia Hídrica”, Publicação Pedagógica, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2002

- [53] Drew, B. ; Plummer, A. R., Sahinkaya, M.N.; “A review of wave energy converter technology”, Department of Mechanical Engineering, University of Bath, Bath, UK, 2009
- [54] Esteves Coelho, Luís Miguel; “Conversores de acção directa no aproveitamento de energia das ondas”, Instituto Superior Técnico - Lisboa, 2007.
- [55] Ferreira, Ângela Paula; “Problemática e perspectivas da utilização do gerador de ímanes permanentes na Produção de Energia Eólica”, Dissertação realizada para a obtenção do grau de Licenciada em Engenharia Eletrotécnica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Dezembro 2000.
- [56] Pinheiro, Eduardo Luiz Reis; “Análise do comportamento dinâmico de usinas eólicas a velocidade variável utilizando ATPDraw”, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; Junho 2004
- [57] Ferreira, Ângela Paula; “Projecto de uma máquina de ímanes permanentes de fluxo axial orientado para os problemas de conversão de energia eólica”, Dissertação realizada para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Eletrotécnica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Setembro 2011.
- [58] Dantas Simões, Bruno; “Dimensionamento de uma máquina síncrona de ímãs permanentes com validação através de um software do tipo elementos finitos”, Viçosa, 2010.
- [59] Vaz Guedes, Manuel; “O Alternador Síncrono Trifásico - Modelização”, FEUP 1996.
- [60] Costa, Artur; “Introdução às máquinas rotativas”, Documentação da unidade curricular Máquinas Elétricas, MIEEC, FEUP 2010.
- [61] Barbosa, Fernando Maciel; “Estabilidade de sistemas elétricos de energia”, FEUP 2013.
- [62] Permanent Magnet Generators, “Price vs RPM”, Disponível em: <http://www.pmgenerators.com/permanent-magnet-generators-price-vs-rpm>, Acesso em 06/06/2013,
- [63] Permanent Magnet Generators, “A new technology for the renewable energy industry”, Disponível em: <http://www.slideshare.net/pmgenerators/permanent-magnet-generator-a-new-technology-for-the-renewable-energy-industry>, Acesso a 05/05/2013.

[64] Permanent Magnet Generators, “How Permanent Magnet Generators Work?”, Disponível em: <http://www.pmgenerators.com/how-permanent-magnet-generators-work>, Acesso a: 06/06/2013

Anexos

Anexo A

Ensaio para a determinação da força eletromotriz

Tabela A 1: Valores obtidos no ensaio para a determinação do valor da força eletromotriz.

n(r/min)	f(hz)	Tensão(V)	Tensão sensor	Binário Sensor (N.m)	Potência mecânica (W)
150	5	31.2	0.076	1.52	23.88
210	7	45.1	0.073	1.46	32.11
300	10	65.8	0.068	1.36	42.73
390	13	85.9	0.067	1.34	54.73
450	15	99.5	0.066	1.32	62.21
510	17	113.1	0.066	1.32	70.50
600	20	133.4	0.065	1.30	81.68
675	22.5	150.3	0.064	1.28	90.48
750	25	167.2	0.062	1.24	97.39
826	27.5	184	0.063	1.26	108.99
901	30	200.9	0.063	1.26	118.89
976	32.5	217.8	0.063	1.26	128.78
1051	35	234.6	0.062	1.24	136.48
1126	37.5	251.4	0.062	1.24	146.22
1201	40	268.3	0.063	1.26	158.47
1276	42.5	285	0.063	1.26	168.37
1351	45	301.8	0.063	1.26	178.27
1426	47.5	318.6	0.063	1.26	188.16
1502	50	335.3	0.063	1.26	198.19
1577	52.5	351.9	0.062	1.24	204.78
1652	55	368.7	0.064	1.28	221.44
1727	57.5	385.4	0.064	1.28	231.50
1802	60	402.1	0.064	1.28	241.55
1862	62	416	0.065	1.30	253.49

Anexo B

Ensaio em carga ôhmica, com o gerador funcionando em modo isolado

Tabela B 1: Valores lidos no ensaio com carga ôhmica.

V (V)	I (A)	Tensão binário (V)	Velocidade (rpm)	W1 (W)	W2 (W)
322.1	0.77	0.201	1499	210	200
329.4	1.50	0.345	1499	420	450
336.4	2.31	0.508	1499	660	695
342.7	3.15	0.684	1499	975	960
346.2	3.95	0.862	1499	1240	1200
348.2	4.76	1.038	1499	1505	1475
347.9	5.53	1.205	1499	1755	1725
345.9	6.20	1.359	1499	1995	1950
343	7.20	1.502	1499	2200	2165
338.8	7.90	1.635	1499	2400	2350
334	8.38	1.756	1499	2575	2500
328.8	9.05	1.862	1499	2725	2650
323.1	9.63	1.956	1499	2855	2775
317.2	10.49	2.04	1499	2955	2875
309.1	11.00	2.133	1499	3055	3000
300.9	11.60	2.216	1499	3195	3095

Tabela B 2: Valores calculados no ensaio com carga ôhmica.

P (W)	Q (VA)	S (VAR)	Fator Pot	Binário (N.m)	Potência Mecânica (W)	Rendimento	Perdas (W)
410	17.32	410.37	0.99911	4.02	631.06	0.6497	221.06
870	-51.96	871.55	0.99822	6.90	1083.16	0.8032	213.16
1355	-60.62	1356.36	0.99900	10.16	1594.91	0.8496	239.91
1935	25.98	1935.17	0.99991	13.68	2147.48	0.9011	212.48
2440	69.28	2440.98	0.99960	17.24	2706.33	0.9016	266.33
2980	51.96	2980.45	0.99985	20.76	3258.90	0.9144	278.90
3480	51.96	3480.39	0.99989	24.10	3783.21	0.9199	303.21
3945	77.94	3945.77	0.99980	27.18	4266.71	0.9246	321.71
4365	60.62	4365.42	0.99990	30.04	4715.67	0.9256	350.67
4750	86.60	4750.79	0.99983	32.70	5133.24	0.9253	383.24
5075	129.90	5076.66	0.99967	35.12	5513.13	0.9205	438.13
5375	129.90	5376.57	0.99971	37.24	5845.93	0.9194	470.93
5630	138.56	5631.70	0.99970	39.12	6141.05	0.9168	511.05
5830	138.56	5831.65	0.99972	40.80	6404.78	0.9103	574.78
6055	95.26	6055.75	0.99988	42.66	6696.76	0.9042	641.76
6290	173.21	6292.38	0.99962	44.32	6957.34	0.9041	667.34

Anexo C

Ensaio em carga indutiva com o gerador funcionando em modo isolado

Tabela C 1: Valores lidos no ensaio em carga indutiva.

Fator carga	V (V)	I (A)	Tensão Binário (Vdc)	Velocidade (rpm)	W1 (W)	W2 (W)
0.108	300.8	1.00	0.12	1499	205	-100
0.163	291.6	1.50	0.14	1499	305	-195
0.217	281.7	2.01	0.14	1499	390	-215
0.271	272.3	2.50	0.15	1499	410	-290
0.327	262.6	3.01	0.16	1499	500	-315
0.387	252.4	3.57	0.18	1499	555	-375
0.433	244.3	4.00	0.19	1499	610	-405
0.488	235.1	4.51	0.20	1499	650	-450
0.542	226	5.01	0.20	1499	675	-475
0.596	217.5	5.50	0.21	1499	725	-505
0.650	209.1	6.00	0.23	1499	775	-545
0.704	200.6	6.50	0.24	1499	800	-555
0.759	192.2	7.00	0.25	1499	810	-560
0.813	184	7.51	0.27	1499	850	-575
0.867	176.2	8.00	0.28	1499	855	-575
0.922	168.3	8.51	0.29	1499	850	-575
0.975	161.4	9.00	0.30	1499	850	-575
1.029	153.6	9.50	0.31	1499	855	-580
1.083	146.9	10.00	0.32	1499	845	-575
1.105	144.7	10.20	0.33	1499	845	-575
1.148	139.4	10.60	0.34	1499	845	-585

Tabela C 2: Valores calculados no ensaio em carga indutiva.

P (W)	Q (VA)	S (VAR)	Fator Potência	Binário (N.m)	Potência Mecânica (W)	Rendimento	Perdas (W)
105	528.28	538.61	0.1949	2.4800	389.31	26.9708	284.31
110	866.03	872.98	0.1260	2.7600	433.26	25.3887	323.26
175	1047.89	1062.40	0.1647	2.8600	448.96	38.9788	273.96
120	1212.44	1218.36	0.0985	3.0600	480.36	24.9814	360.36
185	1411.62	1423.69	0.1299	3.2800	514.89	35.9297	329.89
180	1610.81	1620.83	0.1111	3.6000	565.13	31.8512	385.13
205	1758.03	1769.94	0.1158	3.7000	580.83	35.2946	375.83
200	1905.26	1915.72	0.1044	3.9000	612.22	32.6679	412.22
200	1991.86	2001.87	0.0999	4.0400	634.20	31.5359	434.20
220	2130.42	2141.75	0.1027	4.2400	665.59	33.0532	445.59
230	2286.31	2297.85	0.1001	4.5000	706.41	32.5590	476.41
245	2346.93	2359.68	0.1038	4.8000	753.50	32.5148	508.50
250	2372.91	2386.04	0.1048	5.0400	791.18	31.5984	541.18
275	2468.17	2483.45	0.1107	5.3200	835.13	32.9289	560.13
280	2476.83	2492.61	0.1123	5.5400	869.67	32.1962	589.67
275	2468.17	2483.45	0.1107	5.7400	901.06	30.5195	626.06
275	2468.17	2483.45	0.1107	5.9600	935.60	29.3929	660.60
275	2485.49	2500.66	0.1100	6.2200	976.41	28.1643	701.41
270	2459.51	2474.29	0.1091	6.4600	1014.09	26.6249	744.09
270	2459.51	2474.29	0.1091	6.5600	1029.79	26.2190	759.79
260	2476.83	2490.44	0.1044	6.7200	1054.90	24.6468	794.90

Anexo D

Ensaio em carga capacitiva com o gerador funcionando em modo isolado

Tabela D 1: Valores lidos no ensaio em carga capacitiva.

Fator Carga	V (V)	I (A)	Tensão Binário (Vdc)	W1 (W)	W2 (W)
0.00	321.6	0.00	0.09	0	0
0.06	331.6	0.54	0.10	-100	100
0.12	342.7	1.07	0.09	-200	200
0.18	355.3	1.66	0.10	-300	300
0.40	400.6	3.73	0.12	-750	750
0.50	420.9	4.59	0.14	-1000	1000
0.60	442.5	5.51	0.16	-1250	1250
0.70	463.1	6.44	0.20	-1575	1575
0.75	473.7	6.94	0.22	-1745	1745
0.82	483.2	7.55	0.25	-1895	1905
0.92	500.3	8.53	0.30	-2250	2250
1.04	515.9	9.62	0.35	-2600	2600
1.11	523.3	10.25	0.38	-2795	2795
1.24	536.7	11.47	0.45	-3175	3175
1.30	542.5	11.96	0.47	-3395	3395
1.36	548.8	12.52	0.51	-3550	3560
1.41	554.4	13.01	0.54	-3750	3755

Tabela D 2: Valores calculados no ensaio com carga capacitiva.

P (W)	Q (VA)	S (VAR)	Fator Potência	Velocidade (rpm)	Binário (N.m)	Potencia Mecânica (W)	Rendimento	Perdas (W)
0.00	0.00	0.00	0.00	1499	1.88	295.12	0.00	295.12
0.00	-346.41	346.41	0.00	1499	1.94	304.54	0.00	304.54
0.00	-692.82	692.82	0.00	1499	1.80	282.56	0.00	282.56
0.00	-1039.23	1039.23	0.00	1499	2.00	313.96	0.00	313.96
0.00	-2598.08	2598.08	0.00	1499	2.38	373.61	0.00	373.61
0.00	-3464.10	3464.10	0.00	1499	2.72	426.99	0.00	426.99
0.00	-4330.13	4330.13	0.00	1499	3.24	508.61	0.00	508.61
0.00	-5455.96	5455.96	0.00	1499	3.96	621.64	0.00	621.64
0.00	-6044.86	6044.86	0.00	1499	4.42	693.85	0.00	693.85
10.00	-6581.79	6581.80	0.00	1499	4.90	769.20	1.30	759.20
0.00	-7794.23	7794.23	0.00	1499	5.90	926.18	0.00	926.18
0.00	-9006.66	9006.66	0.00	1499	7.02	1102.00	0.00	1102.00
0.00	-9682.16	9682.16	0.00	1499	7.64	1199.33	0.00	1199.33
0.00	-10998.52	10998.52	0.00	1499	8.90	1397.12	0.00	1397.12
0.00	-11760.62	11760.62	0.00	1499	9.48	1488.17	0.00	1488.17
10.00	-12314.88	12314.89	0.00	1499	10.14	1591.78	0.63	1581.78
5.00	-12999.04	12999.04	0.00	1499	10.80	1695.38	0.29	1690.38

Anexo E

Ensaio do gerador em paralelo com a rede

Tabela E 1: Valores lidos no ensaio do gerador em paralelo com a rede.

Fator Carga	Frequência (Hz)	Velocidade (rpm)	Tensão Gerador (V)	Tensão Sensor (Vdc)	Corrente (A)	W1 (W)	W2 (W)
0.07	50.1	1500	334.6	0.213	0.668	200	150
0.22	50.2	1500	335.7	0.473	1.988	500	575
0.33	50.3	1500	337	0.665	3.028	725	925
0.40	50.4	1500	336.3	0.813	3.71	1050	1200
0.51	50.5	1500	337	1.024	4.711	1225	1440
0.62	50.6	1500	337.9	1.208	5.7	1525	1750
0.72	50.7	1500	338	1.351	6.6	1825	2000
0.78	50.8	1500	338.6	1.521	7.2	2050	2225
0.88	50.9	1500	339	1.674	8.1	2325	2425
0.95	51	1500	339.6	1.854	8.8	2550	2610
1.03	51.1	1500	339.4	1.987	9.5	2875	2775
1.14	51.2	1500	339.7	2.115	10.5	3075	2925

Tabela E 2: Valores calculados no ensaio do gerador em paralelo com a rede.

P (W)	Q (VA)	S (VAR)	Fator Potência	Binário	Potência Mecânica (W)	Rendimento (%)	Perdas (W)
350	86.6025	360.555	0.9707	4.26	669.18	52.30	319.18
1075	-129.9	1082.82	0.9928	9.46	1486.02	72.34	411.02
1650	-346.41	1685.97	0.9787	13.3	2089.22	78.98	439.22
2250	-259.81	2264.95	0.9934	16.26	2554.19	88.09	304.19
2665	-372.39	2690.89	0.9904	20.48	3217.09	82.84	552.09
3275	-389.71	3298.11	0.9930	24.16	3795.16	86.29	520.16
3825	-303.11	3836.99	0.9969	27.02	4244.42	90.12	419.42
4275	-303.11	4285.73	0.9975	30.42	4778.51	89.46	503.51
4750	-173.21	4753.16	0.9993	33.48	5259.19	90.32	509.19
5160	-103.92	5161.05	0.9998	37.08	5824.69	88.59	664.69
5650	173.205	5652.65	0.9995	39.74	6242.54	90.51	592.54
6000	259.808	6005.62	0.9991	42.3	6644.67	90.30	644.67