

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Utilização dos Geradores Síncronos em
Aproveitamentos de Energias Renováveis**

Henrique Luís Pereira Ribas

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

Orientador: Prof. Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes e Costa

Fevereiro de 2009

Resumo

Com o crescente aumento do consumo de energia no mundo, bem como, com a crescente preocupação em torno das questões ambientais e devido aos impactes causados pelas formas tradicionais de produção de energia, vários países têm aumentado significativamente o seu investimento em aproveitamentos de energias renováveis.

Através do protocolo de Quioto, os países participantes têm como objectivos a criação de mecanismos e definição de políticas que permitam reduzir a emissão de gases nocivos para a atmosfera

A Energia, fundamental para o desenvolvimento dos países, no seu processo de conversão/utilização, é a grande responsável pelo total das emissões de gases com efeito de estufa. Torna-se pois necessário estabelecer esses mecanismos e medidas, de modo a que os objectivos propostos sejam alcançados.

O presente trabalho faz um ponto da situação no que se refere à tipificação das soluções que, em termos de geradores eléctricos, são adoptadas em aproveitamentos de energias renováveis para a produção de energia eléctrica.

O trabalho foi estruturado em duas etapas, com os seguintes objectivos:

- Estudo das soluções tecnológicas utilizadas actualmente nos aproveitamentos de energias renováveis, com especial referência aos geradores eléctricos empregues.
- Desenvolvimento de trabalho laboratorial com vista à obtenção de características de funcionamento relevantes da máquina síncrona convencional como gerador isolado e como gerador ligado à rede, em regime permanente.

Palavras-chave: Energias Renováveis, Geradores Eléctricos, Aproveitamentos de Energia Renovável, Gerador Síncrono Convencional.

Abstract

With the energy consumption increase in the world, as well as, the increasing concern about environmental questions and due to the impact caused by the traditional forms of energy management, various countries have significantly increased their investments in renewable energy power plants.

When the protocol of Quioto was signed, the participating countries have as targets the creation of mechanisms and policy-making to reduce the emission of harmful gases into the atmosphere.

Energy, crucial to the development of a country, in the process of conversion/use, is responsible for the large total emissions of greenhouse gases. It is necessary to establish mechanisms and procedures, so that the proposed objectives are achieved.

This work is an updated point of view, regarding the classification of solutions that, in terms of electrical generators, are taken into exploitations in renewable energy to electrical power plants.

It was structured in two stages, with the following objectives:

- Study of technological solutions currently used in renewable energy power plants;
- Development of a laboratorial project in order to obtain relevant characteristics of operation of the conventional synchronous machine as an isolated generator and connected to the grid, on a permanent basis.

Keywords: Renewable Energy, Electric Generators, Renewable Energy Power Plants, Conventional Synchronous Generator.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes e Costa, pela proposta do tema, pelo apoio e total disponibilidade demonstrada ao longo da realização do trabalho.

Ao Engenheiro José Fernando Costa Pinheiro Jorge, pelo apoio e disponibilidade manifestada ao longo da realização prática do trabalho.

Aos Professores, amigos e colegas de curso que de forma indirecta também contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, pelos seus ensinamentos e conselhos.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xvii
Abreviaturas e Símbolos	xix
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Objectivos.....	3
1.2 - Estrutura	4
Capítulo 2	5
As Energias Renováveis	5
2.1 - A energia renovável no mundo	6
2.2 - Situação em Portugal	7
2.3 - Energia eólica	8
2.3.1 - Tecnologia eólica.....	9
2.3.2 - Situação mundial e o caso Português	10
2.4 - Energia hídrica	13
2.4.1 - Aproveitamentos hidroeléctricos	13
2.4.2 - A energia hídrica em Portugal: Passado, Presente e Futuro.....	15
2.4.3 - Mini hídricas	18
2.5 - Energia dos oceanos	19
2.6 - Energias das ondas.....	21
2.6.1 - Potencial do recurso a nível mundial e o caso Português	22
2.6.2 - Formas de aproveitamento: tecnologia	22
2.6.3 - Situação actual e perspectivas futuras	24
2.7 - Energias das marés	25
2.7.1 - Formas de aproveitamento	26
2.7.2 - Tecnologia das marés.....	27
2.7.3 - Situação actual e perspectivas futuras	28
2.8 - Energia da Biomassa.....	29
2.8.1 - Formas de aproveitamento	30
2.8.2 - Situação actual e perspectivas futuras	32

2.8.3 - Resíduos Sólidos Urbanos e os Biocombustíveis	34
2.9 - Síntese/Conclusão	36
Capítulo 3	37
Os Geradores Eléctricos	37
3.1 - Gerador assíncrono	38
3.1.1 - Gerador de indução convencional	39
3.1.2 - Gerador de indução duplamente alimentado	42
3.2 - Gerador síncrono	44
3.2.1 - Gerador síncrono convencional	45
3.2.2 - Gerador síncrono de ímanes permanentes	47
3.3 - Síntese/Conclusão	49
Capítulo 4	51
Os Geradores Eléctricos nos Aproveitamentos de Energia Renovável	51
4.1 - Energia eólica	52
4.1.1 - Geradores para a Energia eólica	52
4.1.2 - Geradores de indução	54
4.1.3 - Geradores síncronos	55
4.1.4 - Mercado actual	56
4.1.5 - Micro-eólica	57
4.2 - Energia das Ondas	58
4.2.1 - Conversão da Energia das Ondas	59
4.2.1.1 - <i>Oscillating Water Columns (OWC)</i>	60
4.2.1.2 - <i>Hydraulic Systems</i>	60
4.2.1.3 - <i>Water turbines</i>	61
4.2.1.4 - <i>Direct drive</i> (acoplamento directo)	62
4.3 - Energia das marés	64
4.3.1 - Geradores eléctricos: topologias	64
4.4 - Energia hídrica	66
4.4.1 - Centrais mini-hídricas	67
4.5 - Energia da Biomassa	68
4.5.1 - Microturbinas	70
4.6 - Síntese/Conclusão	72
Capítulo 5	73
A Máquina Síncrona	73
5.1 - Caracterização laboratorial	74
5.2 - Determinação experimental dos parâmetros	76
5.2.1 - Resistência por fase do estator	76
5.2.2 - Reactâncias síncronas	77
5.2.2.1 - Reactância síncrona longitudinal	77
5.2.2.2 - Reactância síncrona transversal	81
5.2.2.3 - Reactância síncrona transitória e subtransitória longitudinal	85
5.2.2.4 - Reactância subtransitória longitudinal e transversal	89
5.3 - Determinação de características de funcionamento em carga	90
5.3.1 - Funcionamento como gerador isolado da rede	90
5.3.1.1 - Sem regulação de tensão	90
5.3.1.2 - Com regulação de tensão	92
5.3.2 - Funcionamento em paralelo com a rede	93
5.3.2.1 - Regulação de P	93
5.3.2.2 - Regulação de Q	96
5.3.2.3 - Curvas em V	97
5.4 - Diagrama de limites de funcionamento da máquina síncrona	98
5.5 - Síntese e Conclusões	100
Capítulo 6	101

Síntese/Conclusões e Perspectivas Futuras	101
6.1 - Conclusões.....	101
6.2 - Perspectivas futuras	102
Referências e Bibliografia	105
Anexos	111
Anexo A - Sistema p.u.....	112
Anexo B - Resultados experimentais	113
Anexo C - Diagrama de limites de funcionamento	118
Anexo D - Transitórios.	120

Lista de figuras

Figura 1.1 - Fontes de energia alternativa ou renovável [1].	2
Figura 1.2 - Universo tecnológico das máquinas eléctricas CA [2].	3
Figura 2.1 - Estrutura da produção de energia eléctrica a partir de fontes renováveis (esq.) e estrutura da produção total de energia eléctrica (dir.) em 2006 [4].	6
Figura 2.2 - Origem do consumo de energia eléctrica - SEN 2007 (Fonte: www.apren.pt).	7
Figura 2.3 - Turbina eólica de eixo vertical (esq.) e de eixo horizontal (dir.) (Fonte: www.eole.org).	9
Figura 2.4 - Evolução Potência vs Dimensões das turbinas eólicas (Fonte: www.renewables-made-in-germany.com).	9
Figura 2.5 - Distribuição da potência eólica instalada por continente em 2007 [9].	10
Figura 2.6 - Potência eólica instalada na Europa em finais de 2007.	11
Figura 2.7 - Evolução mensal da potência eólica instalada em Portugal [10].	11
Figura 2.8 - Previsão da potência eólica instalada na Europa no período 2000-2030 [12].	12
Figura 2.9 - Aproveitamento hidroeléctrico à fio-de-água (esq.) e albufeira (dir.).	14
Figura 2.10 - Ábacos para escolha de turbinas [14].	14
Figura 2.11 - Evolução da potência hidroeléctrica em Portugal [13].	15
Figura 2.12 - Potencial hídrico: comparação entre países da UE [16].	17
Figura 2.13 - PCH: Evolução da potência instalada [13].	18
Figura 2.14 - Métodos de extracção da energia dos oceanos [18].	20
Figura 2.15 - Distribuição mundial das tecnologias de conversão em desenvolvimento [18].	20
Figura 2.16 - Classificação do tipo de tecnologia em relação à distância à costa [20].	21
Figura 2.17 - Distribuição do potencial mundial das ondas em kW/m de frente de onda [18].	22
Figura 2.18 - Principais dispositivos de tipologia OffShore (Fonte: www.energiasrenovaveis.com).	23
Figura 2.19 - Dispositivo do tipo <i>OnShore</i> (esq.) e <i>NearShore</i> (dir.) (Fonte: www.energiasrenovaveis.com).	24
Figura 2.20 - Interacção Terra, Sol e Lua [24].	25
Figura 2.21 - Tidal barrage (esq.), tidal lagoon (centro) e tidal stream (dir.) [19].	26
Figura 2.22 - <i>Tidal stream</i> : possibilidades de configuração do rotor [19].	28

Figura 2.23 - Estado de desenvolvimento das várias tecnologias de energia dos oceanos [28].	28
Figura 2.24 - Produção da Biomassa [29].	30
Figura 2.25 - Processos de conversão da Biomassa [31].	31
Figura 2.26 - Potência total disponível para centrais de Biomassa florestal.	33
Figura 2.27 - Rede de centrais de Biomassa [33].	33
Figura 2.28 - Soluções previstas para o tratamento e gestão dos RSU no período 2007-2013 [35].	34
Figura 2.29 - Localização geográfica dos investimentos em Biocombustíveis [34].	36
Figura 3.1 - Rotor em gaiola de esquilo (esq.) e bobinado (dir.) [20].	38
Figura 3.2 - Potência reactiva Q consumida em função da potência activa P produzida [7].	39
Figura 3.3 - Máquina de indução convencional [39].	40
Figura 3.4 - Característica da tensão em função da corrente de carga para um factor de potência constante [39].	40
Figura 3.5 - Máquina assíncrona duplamente alimentada [41].	42
Figura 3.6 - Esquema geral de controlo do DFIG, conversores e controladores [40].	43
Figura 3.7 - Máquinas síncronas - rotor cilíndrico (esq.) e de pólos salientes [48].	46
Figura 3.8 - Curvas características de um alternador para distintos tipos de cargas; a) Características externas e b) Características de regulação [49].	47
Figura 3.9 - Aspecto construtivo de uma máquina síncrona de ímanes permanentes.	48
Figura 4.1 - Adaptação da turbina e gerador eólico [56].	53
Figura 4.2 - Aerogerador de indução convencional [55].	53
Figura 4.3 - Aerogerador de indução duplamente alimentado [55].	54
Figura 4.4 - Aerogerador síncrono com acoplamento directo [58].	55
Figura 4.5 - Percentagem de geradores utilizados em sistemas ME [51].	58
Figura 4.6 - WavePlane production [20].	59
Figura 4.7 - Oscillating Wave Columns (OWC) [21].	60
Figura 4.8 - Esquema de um sistema hidráulico [60].	61
Figura 4.9 - Overtopping device [21].	61
Figura 4.10 - Archimedes Wave Swing (AWS) [21].	62
Figura 4.11 - Tidal barrage com turbina do tipo Bulbo [63].	64
Figura 4.12 - Comparação entre turbinas eólica e marés [62].	65
Figura 4.13 - Open-Centre turbine (Fonte: www.openhydro.com).	65
Figura 4.14 - Esquema típico de uma central mini-hídrica [68].	67
Figura 4.15 - Produção de electricidade a partir da Biomassa.	69
Figura 4.16 - Rendimento comparativo entre diversas tecnologias [74].	70
Figura 4.17 - Microturbina (Fonte: www.microturbine.com).	70
Figura 4.18 - Esquema de uma microturbina: 1 eixo (esq.) e 2 eixos (dir.) [76].	71
Figura 5.1 - Controlo da máquina primária acoplada à máquina síncrona.	74
Figura 5.2 - Método do Voltímetro-Amperímetro.	76
Figura 5.3 - Esquema de montagem: ensaio em vazio.	77

Figura 5.4 - Característica interna em vazio.	78
Figura 5.5 - Esquema de montagem: ensaio em curto-circuito.	79
Figura 5.6 - Característica de curto-circuito.	79
Figura 5.7 - Característica de vazio e de curto-circuito.	80
Figura 5.8 - Linearização da característica em vazio.	80
Figura 5.9 - Esquema de montagem: ensaio com baixo deslizamento.	82
Figura 5.10 - Ensaio com baixo deslizamento: alinhamento do rotor relativamente ao campo girante.	83
Figura 5.11 - Oscilogramas típicos do ensaio com baixo deslizamento.	83
Figura 5.12 - Formas de onda da tensão (2) e da corrente (1) obtidas experimentalmente. ...	84
Figura 5.13 - Esquema de montagem: ensaio de curto-circuito trifásico brusco.	85
Figura 5.14 - Registo oscilográfico: corrente de curto-circuito.	86
Figura 5.15 - Corrente de curto-circuito numa fase e curva envolvente.	87
Figura 5.16 - Corrente de curto-circuito logaritmizada.	87
Figura 5.17 - Linearização da componente aperiódica da corrente de cc.	88
Figura 5.18 - Esquema de montagem: aplicação de tensão nas 2 posições do eixo dos pólos.	89
Figura 5.19 - Esquema de montagem: ensaio em carga.	91
Figura 5.20 - Característica externa da máquina síncrona.	91
Figura 5.21 - Características de regulação da máquina síncrona.	92
Figura 5.22 - Esquema de montagem: ensaio em paralelo com a rede.	93
Figura 5.23 - Característica Binário - Velocidade da máquina assíncrona.	95
Figura 5.24 - Potência activa gerada em função da frequência de alimentação da máquina primária.	95
Figura 5.25 - Curvas $f.d.p=g(I_e)$	96
Figura 5.26 - Curvas em V.	97
Figura 5.27 - Diagrama fasorial da máquina síncrona pelo método de Behn Eschenburg.	98
Figura 5.28 - Diagrama de limites de funcionamento.	99
Figura B.1 - Determinação da reactância síncrona saturada.	114
Figura C.1 - Diagrama de limites de funcionamento.	119
Figura D.1 - Corrente de curto-circuito, fase U.	120
Figura D.2 - Corrente de curto-circuito, fase V.	120
Figura D.3 - Corrente de curto-circuito, fase W.	121

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Energias renováveis em Portugal: metas para 2010 (Fonte: www.inag.pt).	8
Tabela 2.2 - Centros produtores hidroelétricos - situação em 01 de Janeiro de 2008.....	16
Tabela 2.3 - Aproveitamentos hidroelétricos inseridos no PNBEPH (Fonte: www.inag.pt). ..	18
Tabela 2.4 - Potencialidades energéticas mundiais [18].....	19
Tabela 2.5 - Características e equipamentos existentes por tipo de instalação no mar [21]. .	23
Tabela 2.6 - Pontos fortes e fracos no caso Português (Fonte: PNEO).	24
Tabela 2.7 - Maiores amplitudes de marés a nível mundial [25].	25
Tabela 2.8 - Unidades produtoras de energia das marés [25].	27
Tabela 2.9 - Origem da Biomassa - Classificação por sector [29].	30
Tabela 4.1 - Comparação entre tecnologia eólica [54].	56
Tabela 4.2 - Tecnologia eólica: alguns fabricantes actuais [55].	57
Tabela 4.3 - Soluções tecnológicas utilizadas em sistemas de conversão de energia das ondas [59].	63
Tabela 5.1 - Caracterização da actividade experimental.	74
Tabela 5.2 - Chapa de características da máquina primária.	75
Tabela 5.3 - Chapa de características do gerador síncrono.	75
Tabela 5.4 - Principais equipamentos utilizados.	75
Tabela 5.5 - Resultados obtidos para as 2 posições do eixo do rotor.....	90
Tabela B.1 - Ensaio em vazio para $n=1500$ rpm.	113
Tabela B.2 - Ensaio em curto-circuito.	113
Tabela B.3 - Determinação da impedância síncrona.	114
Tabela B.4 - Ensaio em carga (sem regulação de tensão).	115
Tabela B.5 - Ensaio em carga (com regulação de tensão).	116
Tabela B.6 - Método do Voltímetro-Amperímetro.	116
Tabela B.7 - Regulação de Potência activa.	116
Tabela B.8 - Curvas em V.....	117

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

AWS	<i>Archimedes Wave Swing</i>
CA	Corrente Alternada
CE	Comissão Europeia
CEI	Comissão Electrotécnica Internacional
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
DFIG	<i>Double Fed Induction Generator</i> (Gerador de indução duplamente alimentado)
ETBE	Éter etil-ter-butílico (C ₆ H ₁₄ O)
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FER	Fontes de Energia Renovável
H ₂	Hidrogénio
GIGE	Gerador de Indução com rotor em Gaiola de Esquilo
GSIP	Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes
ME	Micro-Eólica
OWC	<i>Oscillating Wave Column</i>
PCH	Pequenas Centrais Hidroelétricas
PNBEPH	Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico

Lista de símbolos

U _n	Tensão nominal composta
U _o	Tensão em vazio
E	Força Electromotriz
I _n	Corrente nominal
I _{cc}	Corrente de curto-circuito
I _e	Corrente de excitação

f_n	Frequência nominal
Z_s	Impedância síncrona
Z_{sd}	Impedância síncrona no eixo longitudinal
Z_{sq}	Impedância síncrona no eixo transversal
R_1	Resistência por fase do estator
$R_{T_{ref}}$	Resistência por fase do induzido para a temperatura de referência
$R_{T_{amb}}$	Resistência por fase do induzido à temperatura ambiente
X_s	Reactância síncrona
X_{sd}	Reactância síncrona no eixo longitudinal
X_{sq}	Reactância síncrona no eixo transversal
P_n	Potência activa nominal
Q	Potência Reactiva
ω_s	Velocidade angular de sincronismo
$\cos \varphi_n$	Factor de potência nominal
n_s	Velocidade de rotação de sincronismo
n_n	Velocidade de rotação nominal
s	Deslizamento
α	Coeficiente para enrolamentos em cobre
T_{ref}	Temperatura de referência para a classe de isolamento
T_{amb}	Temperatura ambiente

Capítulo 1

Introdução

A intensificação dos consumos de energia eléctrica registados actualmente vê-se confrontada com a diminuição das reservas dos combustíveis fósseis. Por outro lado, as preocupações às quais assistimos na temática das alterações climáticas exigiu uma forma de repensar a forma como se produz e se consome energia eléctrica. Através do processo de conversão e utilização de energia são libertadas grandes toneladas de gases com efeito de estufa (GEE), sendo estes responsáveis pelo aumento da temperatura média no Planeta Terra quando emitidos de forma descontrolada e exagerada.

Neste contexto, a aposta em estratégias de eficiência energética bem como nas fontes de energia renovável ou alternativa são vistas como um grande trunfo para amenizar estas consequências e uma solução para um futuro energético sustentável.

A instabilidade dos preços dos combustíveis fósseis demonstra o quão dependente está a situação energética mundial. O caso de Portugal demonstra bem este cenário e sendo o nosso país caracterizado pelos escassos recursos fósseis que possui, a nossa dependência energética do exterior é grande (84,1 % em 2006). É mais do que evidente a necessidade de aumentar a parcela das energias renováveis no sector energético, contribuindo de forma decisiva para a diversificação das fontes de energia.

Assim sendo, e numa perspectiva futura a médio prazo, o estabelecimento de medidas actuais levará ao cumprimento dos objectivos acordados no Protocolo de Quioto por cada um dos países.

A aposta nas energias renováveis cria um grande desafio. Por um lado, porque é necessário controlar tecnologias que ainda não estão totalmente estabilizadas e amadurecidas. Por outro, porque é necessário estabelecer um justo equilíbrio entre os incentivos dados aos produtores e a manutenção de tarifas competitivas, o que requer gerir de forma dinâmica a oferta de energia e os custos gerais do sistema.

Os números actuais falam por si e, actualmente, Portugal encontra-se bem colocado no contexto Europeu, devido ao conjunto ambicioso de medidas tomadas pelo Governo português na promoção das energias renováveis, ocorrendo um grande salto qualitativo e quantitativo na energia eólica, solar, biocombustíveis e energia das ondas.

As energias renováveis são fontes de energia inesgotáveis podendo ser repostas a curto ou médio prazo. Por outro lado, as unidades produtoras que integrem em si uma fonte renovável como recurso primário são caracterizadas pelas emissões nulas de gases de efeito de estufa quando entram em operação.

A figura 1.1 apresenta as diversas fontes primárias alternativas existentes sendo elas: energia eólica, energia solar, energia das ondas, energia das marés, energia hídrica, energia da Biomassa e energia Geotérmica.

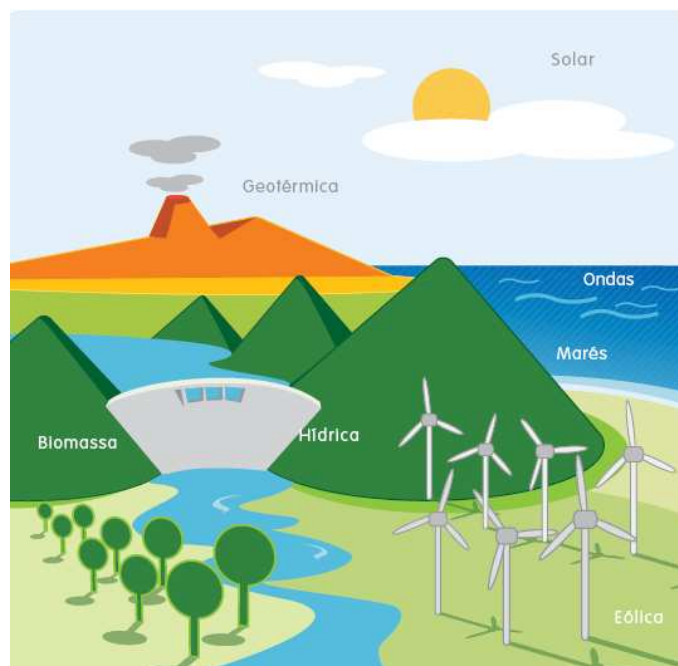


Figura 1.1 - Fontes de energia alternativa ou renovável [1].

À excepção da Energia solar, que faz uso de uma tecnologia muito própria para produção de energia eléctrica baseada em células fotovoltaicas, todas as restantes fazem uso do gerador eléctrico.

Nos sistemas de conversão, a energia mecânica retirada pelos elementos acoplados aos geradores (por exemplo, turbinas (turbogeradores, hidrogeradores, eólicas, etc.)) da fonte primária é aproveitada para produção de energia eléctrica. As máquinas eléctricas trifásicas de corrente alternada (CA) desempenham actualmente um papel importante na produção de energia eléctrica.

Por outro lado, as possibilidades tecnológicas em termos de geradores eléctricos são várias. A figura 1.2 representa esquematicamente as soluções possíveis para as máquinas trifásicas em CA. Actualmente, a opção pelo gerador (assíncrono ou síncrono) nas suas diversas variantes vai depender essencialmente quer das características de controlabilidade que estes possuem quer da sua interacção com o recurso primário. Mais adiante, iremos abordar este assunto.

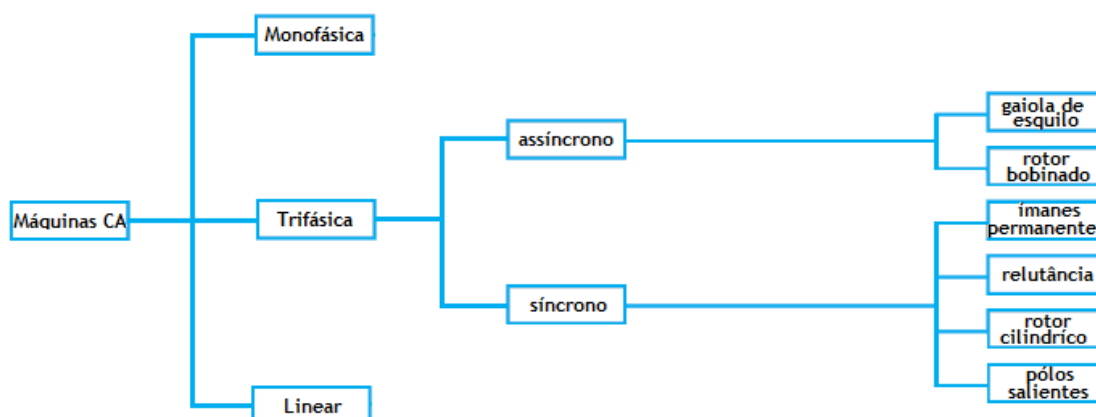


Figura 1.2 - Universo tecnológico das máquinas eléctricas CA [2].

1.1 - Objectivos

O trabalho aqui apresentado foi estruturado numa parte teórica e prática e teve como principais objectivos:

- Fazer um ponto de situação actualizado no que se refere à tipificação das soluções tecnológicas que, em termos de geradores eléctricos, são adoptados em aproveitamentos de energias renováveis para a produção de energia eléctrica ou cujo potencial se encontra ainda em avaliação;
- Desenvolver um trabalho laboratorial com vista à caracterização do funcionamento da máquina síncrona convencional como gerador.

A metodologia adoptada para o cumprimento do primeiro objectivo baseou-se na pesquisa e recolha de elementos teóricos que se achou relevante, tendo sido feita sua análise e discussão.

A metodologia adoptada no âmbito do segundo objectivo baseou-se na definição de um plano de ensaios para obtenção de parâmetros e características de funcionamento para a máquina em estudo. A realização experimental permitiu um aprofundamento dos conhecimentos sobre a máquina síncrona enquanto gerador eléctrico que o autor não possuía até à data.

1.2 - Estrutura

Esta dissertação é constituída por cinco capítulos, estruturados da seguinte forma; além do presente:

O Capítulo 2, dedicado às Energias Renováveis, pretende caracterizar de forma sucinta as fontes primárias de energia, incidindo principalmente no seu nível de amadurecimento a nível mundial, reportando sempre para o caso Português, a título comparativo.

O capítulo 3 descreve os geradores eléctricos de corrente alternada com maior aplicação actual no domínio da produção de energia eléctrica. Deste modo, procura-se descrever as aptidões que cada um destes possui no controlo de grandezas eléctricas, com vista ao seu uso em aproveitamentos de energias renováveis.

O capítulo 4 faz fazer uma abordagem teórica sobre a aplicação dos geradores eléctricos nos aproveitamentos de energia eléctrica de fonte renovável. Cobrem-se as situações mais representativas (aproveitamentos eólicos, por exemplo) mas analisam-se também as menos comuns ou menos desenvolvidas.

O capítulo 5 é dedicado à descrição e apresentação dos resultados obtidos nos ensaios realizados à máquina síncrona convencional em regime permanente funcionando como gerador eléctrico.

No capítulo 6 são apresentados as principais conclusões deste trabalho, indicando-se algumas perspectivas para a sua continuidade futura.

Capítulo 2

As Energias Renováveis

O momento de mudança a que assistimos no domínio das energias renováveis é caracterizado pela necessidade de responder ao desafio criado pelas alterações climáticas e pela necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

O acesso à energia é fundamental para o desenvolvimento das sociedades. As exigências energéticas cada vez maiores obrigam à utilização crescente dos recursos energéticos disponíveis, com consequências por vezes nefastas para o ambiente. De facto, a maior parte da energia usada no mundo provém de combustíveis fósseis, como o carvão, o gás ou o petróleo, cujas reservas têm vindo a diminuir. Adicionalmente, a utilização intensiva destes combustíveis fósseis aumenta a concentração de dióxido de carbono na atmosfera que contribui para o aquecimento global do Planeta¹. O nosso estilo de vida pode estar ameaçado e o nosso futuro comprometido se não encontrarmos novas soluções. Por essa razão, multiplicam-se os esforços na promoção da utilização eficiente da energia e na aposta em fontes de energia renováveis [1].

O novo conceito de aproveitamento de energia cria muitas oportunidades: mais investigação e desenvolvimento tecnológico, mais investimento inovador e mais empregos. Poderemos estar à beira de uma revolução tecnológica com uma importância semelhante à ocorrida nas Tecnologias da Informação e da Comunicação.

As energias renováveis constituem, pois, um motor de desenvolvimento económico, social e tecnológico. Estão na base da promoção de importantes investimentos, da criação de emprego e de desenvolvimento regional, sendo de realçar o desenvolvimento de *clusters* tecnológicos e de investigação; a promoção de fileiras agrícolas nacionais; a criação de infra-estruturas para reservas de água e controlo de cheias; a introdução de políticas concertadas para a redução de risco de incêndios; o aumento da vida útil dos aterros [3].

¹ Efeito de estufa

2.1 - A energia renovável no mundo

A produção de electricidade com origem nas fontes de energia renovável atingiu em 2006 cerca de 18,6 % da produção total a nível mundial. Esta percentagem é superior à registada pela energia nuclear (cerca de 15 % em 2006), estando atribuído grande percentagem à produção eléctrica de origem fóssil: 66,2 %. Os restantes 0,2 % resultam da combustão de resíduos considerados não renováveis (ver figura 2.1) [4].

A produção de energia eléctrica dita renovável tem origem em seis fontes. A produção hidroeléctrica é a maior de entre estas, representando 89 % do conjunto. A Biomassa, que agrupa em si, a biomassa sólida, a biomassa líquida, biogás e resíduos domésticos, é a segunda maior, com 5,7 %. Estas são seguidas pela energia eólica (3,5 %), geotérmica (1,7 %) e solar, que inclui o solar térmico (0,2 %), e pela energia provenientes das correntes marítimas (0,02 %).

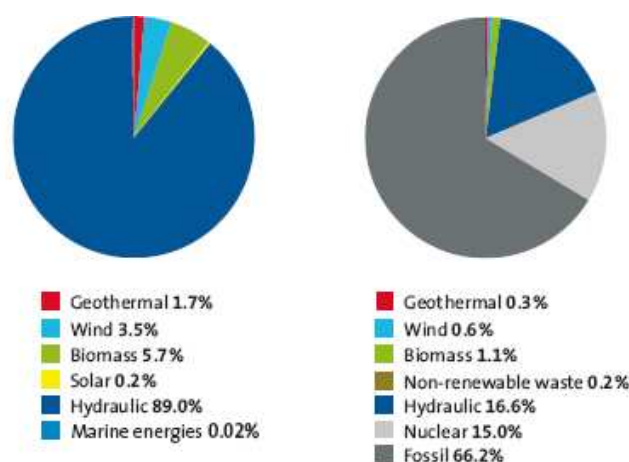


Figura 2.1 - Estrutura da produção de energia eléctrica a partir de fontes renováveis (esq.) e estrutura da produção total de energia eléctrica (dir.) em 2006 [4].

Em Portugal, a aposta nas energias renováveis apresenta um dinamismo inédito caracterizado por avanços consideráveis resultantes da reestruturação do sector eléctrico e da aprovação de legislação específica. Dentro das fontes de energia renovável (FER) mais recentes (excluindo a grande hídrica), a energia eólica é a que se tem destacado, em grande parte devido à maturidade tecnológica e à fiabilidade atingida em termos mundiais. Em [5] são apresentados os índices de penetração das energias renováveis a nível Europeu e mundial.

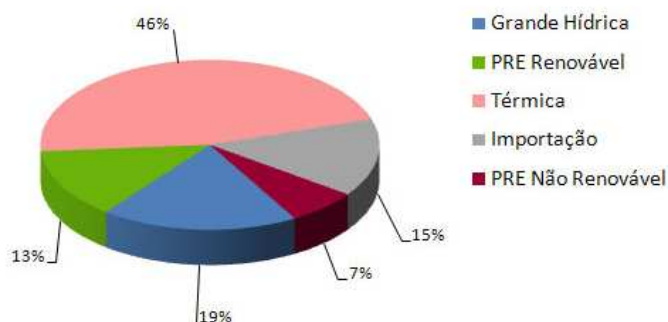


Figura 2.2 - Origem do consumo de energia eléctrica - SEN 2007 (Fonte: www.apren.pt).

2.2 - Situação em Portugal

Portugal aprovou, nos últimos anos, um conjunto ambicioso de medidas para a promoção das energias renováveis. O desenvolvimento da política energética nacional traduz a visão do Governo, expressa na Resolução de Conselho de Ministros de Outubro de 2005.

A Estratégia Nacional para a Energia estabeleceu vários objectivos, nomeadamente a criação sem precedentes do investimento em energias renováveis. O desenvolvimento desta estratégia está a tornar Portugal numa referência a nível da energia eólica [3].

A aposta nas energias renováveis visa limitar a intensidade carbónica de economia e contribuir para a diversificação e sustentabilidade do sector energético. Assenta, em especial, no desenvolvimento das energias hídrica e eólica, na Biomassa, no incentivo aos biocombustíveis e na energia solar.

No quadro da Directiva 2001/77/CE, de 27 de Setembro de 2001, relativa à promoção de electricidade produzida a partir de fontes de energia renovável (FER), Portugal assumiu de, até 2010, atingir uma meta de 39 %. Em 2005, Portugal foi o país da União Europeia que mais cresceu na capacidade de produção eólica e, em 2006, entraram em funcionamento 36 novos parques eólicos, representando um crescimento de 60 % da potência instalada. Dada a importância estratégica da aposta nas energias renováveis, o Governo definiu, em 2007, compromissos mais ambiciosos para 2010, entre os quais:

- 45 % de toda a electricidade consumida será de base renovável

Neste sentido, foram estabelecidos novos objectivos para as várias fontes de energia renovável (tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Energias renováveis em Portugal: metas para 2010 (Fonte: www.inag.pt).

Referência	Metas anteriores	Novas Metas 2007-2010
Produção de electricidade com base em energias renováveis	39% do consumo bruto	45% do consumo bruto
Energia hidroeléctrica	46% do potencial 5000 MW em 2010	7000 MW em 2020 70% do potencial (5575 MW em 2010)
Energia eólica	3750 MW	5100 MW + 600 MW por <i>upgrade</i> do equipamento
Biomassa	100 MW	150 MW
Solar	50 MW	150 MW
Ondas	50 MW	250 MW em zona piloto
Biogás	50 MW	100 MW
Biocombustíveis nos transportes rodoviários	5,75%	10%
Micro-geração	-	50000 Sistemas

2.3 - Energia eólica

A relação do Homem com o vento não é de todo recente e, de facto, muito cedo ele se apercebeu das potencialidades que este recurso oferecia. No entanto, o aproveitamento do vento em grande escala comercial para fins de produção eléctrica somente apareceu no final do século XX. Este impulso deveu-se essencialmente à Europa e aos Estados Unidos, desenvolvendo-se uma indústria de produtos e componentes de avançada tecnologia.

A energia eólica é vista como uma das mais promissoras fontes de energia renováveis, caracterizada por uma tecnologia madura. De facto, esta tecnologia tem registado uma evolução verdadeiramente assinalável, destacando-se a grande aposta realizada no continente Europeu, tendo como exemplo a Alemanha e a Espanha, que já ultrapassou a potência eólica instalada dos EUA. Esta evolução deve ser encarada à luz dos objectivos de desenvolvimento das energias renováveis traçadas pela União Europeia [6].

Por outro lado, a grande evolução tecnológica potenciou a investigação e o desenvolvimento de turbinas com cada vez mais potência e maior tamanho, resultando em benefícios do ponto de vista económico e ambiental.

Apesar da elevada maturidade que os conversores eólicos atingiram no panorama das energias renováveis, ainda subsiste um conjunto de conceitos de projectos não consensualizado e que resultam em diferentes opções tomadas pelos fabricantes. Exemplo disso, podem destacar-se os materiais empregues no fabrico das pás e da torre, o tipo de gerador eléctrico (assíncrono ou síncrono), sistemas de controlo de potência entre outras.

No futuro, uma das áreas onde se registarão maiores avanços será certamente a instalação de turbinas eólicas no mar². A tendência para o aumento da potência unitária, em conjunto com um melhor conhecimento da tecnologia das fundações das turbinas no mar e das condições de vento no local, está a contribuir para tornar mais competitiva esta forma de aproveitar a energia do vento em condições ambientais diferentes [7].

² Tecnologia *OffShore*

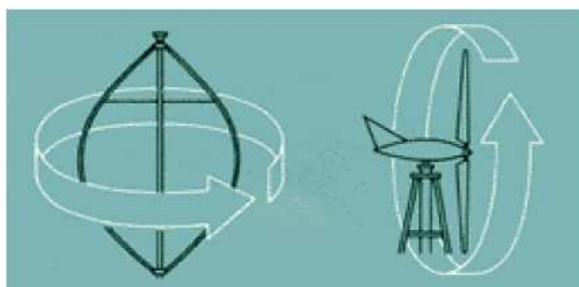


Figura 2.3 - Turbina eólica de eixo vertical (esq.) e de eixo horizontal (dir.) (Fonte: www.eole.org).

2.3.1 - Tecnologia eólica

A necessidade de aumentar a escala dos projectos de energia eólica levou à necessidade de desenvolver turbinas com maiores potências acarretando, por isso, maiores dimensões, como ilustra a figura 2.4. A evolução tecnológica nesta área permitiu o início da introdução das máquinas de grande porte, podendo actualmente estas chegar a potências unitárias de vários MW. A tendência para as soluções de maiores envergaduras resulta em inúmeras vantagens, permitindo o aproveitamento de energia em maiores quantidades, de forma eficiente, para a mesma área de ocupação [7].

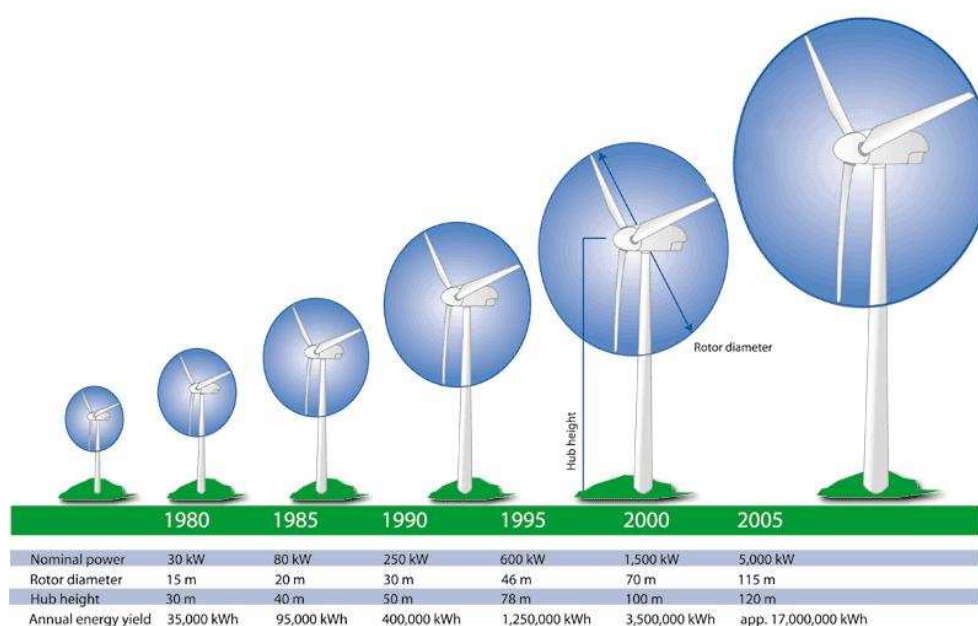


Figura 2.4 - Evolução Potência vs Dimensões das turbinas eólicas (Fonte: www.renewables-made-in-germany.com).

Os programas de investigação contribuíram significativamente para uma certa uniformização do desenvolvimento tecnológico das turbinas. De facto, uma análise à oferta do mercado permite verificar a dominância de algumas opções básicas de projecto, designadamente, os rotores de três pás (cerca de 90 %) em relação aos de duas, a colocação

do rotor na posição frontal da torre³ relativamente à sua colocação na retaguarda (em relação à direcção do vento) e as turbinas de eixo horizontal relativamente às de eixo vertical (figura 2.3). Este último tem a particular vantagem de não necessitar de mecanismos de regulação de acompanhamento das variações do vento [7].

Outra importante evolução tecnológica foi a implementação da electrónica de potência, que associada a técnicas de controlo resultou em benefícios para a aplicabilidade da energia eólica e sua integração na rede eléctrica.

Actualmente, os sistemas de conversão de energia eólica são constituídos maioritariamente por 4 tipos de aerogeradores:

- com gerador de indução convencional do tipo gaiola de esquilo;
- com gerador de indução duplamente alimentado;
- com gerador síncrono convencional;
- com gerador síncrono de ímanes permanentes

2.3.2 - Situação mundial e o caso Português

Como resultado do prematuro desenvolvimento por parte dos EUA e, posteriormente, da Europa, a tecnologia eólica atingiu um amadurecimento considerável combinando benefícios ambientais, fiabilidade e relação custo/eficácia elevado. A aceitabilidade da energia eólica como tecnologia é cada vez mais crescente, totalizando ao nível mundial aproximadamente 94000 MW em 2007 de potência instalada [9] e com uma distribuição a nível mundial como mostra a figura 2.5.

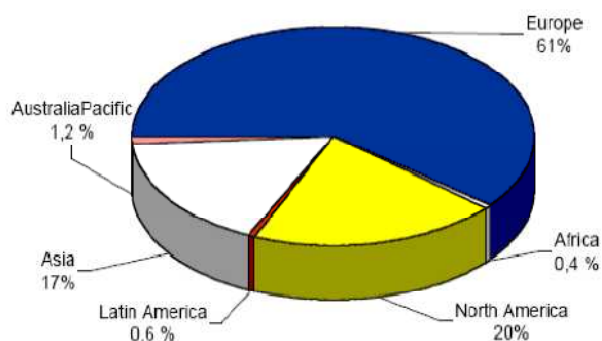


Figura 2.5 - Distribuição da potência eólica instalada por continente em 2007 [9].

Em 2007, a capacidade eólica na Europa cresceu mais do que qualquer outra tecnologia de produção. Resultados estatísticos revelam que a capacidade eólica instalada aumentou 18 % em 2006 alcançando 56535 MW.

A título de curiosidade e para mostrar a forte aposta nesta área, Espanha estabeleceu um novo recorde em 2007, instalando cerca de 3522 MW - o maior valor até hoje alcançado comparado com outros países a nível Europeu [1]. Caminho idêntico estão a percorrer os

³ "UpWind"

novos estados membros, registando um bom desempenho e contando com uma capacidade aumentada em 60 %, com a Polónia, o maior sucesso, alcançando um total de 276 MW. A figura 2.6 regista a potência eólica instalada no continente Europeu até finais de 2007.



Figura 2.6 - Potência eólica instalada na Europa em finais de 2007 [9].

Também no caso Português, a tentativa de ver cumprido os objectivos do protocolo de Quioto também influenciou, em muito, a aposta nesta fonte de origem renovável. Considerando as hipóteses de evolução das outras tecnologias de produção, bem como o crescimento previsível de consumo, será necessário instalar uma potência eólica superior a 3750 MW. A figura 2.7 indica a evolução no ano de 2008 relativo à potência instalada em Portugal, representando esta fonte de energia 16 % do total da capacidade instalada no SEN [10].

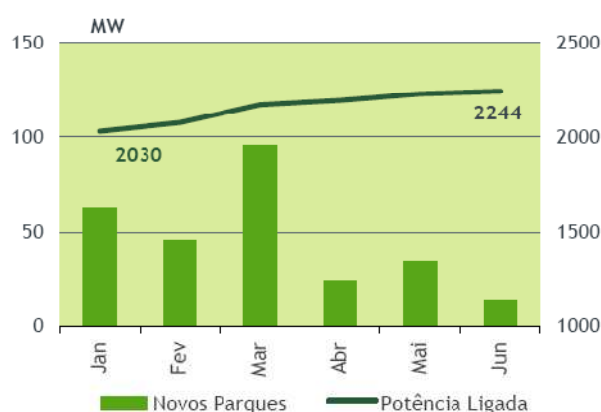


Figura 2.7 - Evolução mensal da potência eólica instalada em Portugal [10].

A energia eólica *OffShore* tem demonstrado a sua viabilidade económica em todo o mundo e numerosos parques já se encontram em operação. Este tipo de aproveitamento, por assim dizer, apresenta considerações distintas quando comparada como o tradicional *OnShore*. As condições de exploração no mar propiciam ventos com regime de velocidades de vento mais elevados e constantes, resultando em maiores quantidades de energia eléctrica produzida.

Embora o desenvolvimento do *OffShore* apresente vantagens face à sua congénere *OnShore*, os maiores custos de investimento inicial (resultante da construção das fundações e dificuldades de exploração e manutenção) e maiores desafios na sua instalação, poderão ser um entrave à penetração desta forma de aproveitamento no mundo [11].

A figura 2.8 indica a previsão de potência instalada (não acumulada) até 2030, indicando um crescimento acentuado do *OffShore*. Neste sector, a Dinamarca lidera o mercado, com cerca de 409 MW instalados, seguido pelo Reino Unido (404 MW) e Suécia (133 MW) [12].

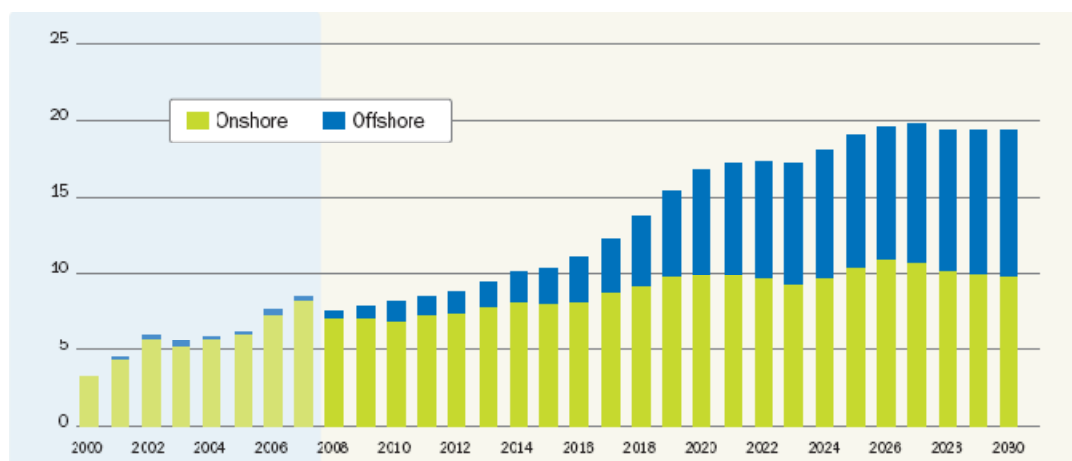


Figura 2.8 - Previsão da potência eólica instalada na Europa no período 2000-2030 [12].

2.4 - Energia hídrica

A água constitui um dos recursos mais abundantes no nosso planeta. De facto, dois terços da superfície terrestre é coberta por água, correspondendo a um volume de quase 1,5 milhão de quilómetros cúbicos. Cerca de 97 % desta encontra-se nos oceanos, 2% está sob a forma sólida e 1% distribui-se em rios, lagos, reservas subterrâneas e vapor de água na atmosfera. A água sofre um permanente ciclo natural permitindo a sua contínua “renovação” nos mais diversos estados da natureza.

A utilização da água como força motriz para produção de energia eléctrica inicia-se ao nível mundial em meados do século XIX e em Portugal na última década desse século, tendo-se desenvolvido de uma forma espontânea até por volta de 1930, ditada pelas necessidades de satisfazer consumos locais [13].

A energia hídrica resulta do aproveitamento da energia potencial da água existentes nos rios, utilizando desníveis naturais, como quedas de água, ou artificiais, produzidos pelo desvio do curso original do rio. Os impactes tanto ao nível da fauna e da flora, associados aos grandes aproveitamentos hidroeléctricos, têm sido “responsáveis” pelos inúmeros estudos de impacte ambiental e processos por vezes demorados, muitas das vezes incompatíveis com os prazos de construção destes tipos de empreendimentos e as necessidades energéticas presentes.

Mais recentemente, a legislação relativa à produção em regime especial veio relançar a produção de electricidade a partir de pequenas centrais hidroeléctricas (PCH), permitindo dinamizar o seu desenvolvimento [13]. Por outro lado, o Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroeléctrico (PNBEPH), apresentado a 04 de Outubro de 2007, tem por objectivo atingir uma capacidade hidroeléctrica nacional superior a 7000 MW, em 2020, contribuindo para a diminuição da dependência energética do país face ao exterior e para o cumprimento das metas traçadas no âmbito das energias renováveis.

Num cenário em que se assiste à prematura fase de desenvolvimento de outras tecnologias de origem renovável, a energia hídrica ainda constitui umas das apostas para o sector electroprodutor tendo em conta o potencial hídrico ainda por explorar.

2.4.1 - Aproveitamentos hidroeléctricos

Os aproveitamentos hidroeléctricos, para além do seu contributo em termos de energia dadas as suas características de armazenamento de energia e potência, assumem um papel importante na exploração do sistema eléctrico. Estes centros produtores apresentam elevados níveis de disponibilidade e fiabilidade [13].

É habitual classificarem-se as centrais hidroeléctricas de acordo com os dois seguintes tipos [14]:

- **Centrais de albufeira:** em que a água é armazenada num reservatório (albufeira) sendo depois levada até à turbina através de conduta forçada, caracterizando-se por médias a altas quedas úteis (figura 2.9);
- **Centrais de fio-de-água:** em que a central é construída no próprio leito do rio, não havendo armazenamento significativo de água, e caracterizando-se por apresentar baixas e médias quedas úteis e elevados caudais (figura 2.9).



Figura 2.9 - Aproveitamento hidroeléctrico à fio-de-água (esq.) e albufeira (dir.).

Relativamente às turbinas, a sua escolha é influenciada pelas características do caudal (m^3/s) bem como da queda (m) podendo ser agrupadas em duas categorias principais:

- Turbinas de acção: para caudais baixos e quedas úteis elevadas;
- Turbinas de reacção: para quedas úteis pequenas e caudais elevados.

Dentro da categoria de turbinas de acção estão mais vulgarizadas as turbinas Pelton e Banki (para mini-hídricas), e, na categoria de turbinas de reacção, encontram-se as turbinas Kaplan e Francis. A utilização de ábacos de escolha (figura 2.10) permite-nos seleccionar a turbina a adoptar em função da queda e caudal existentes.

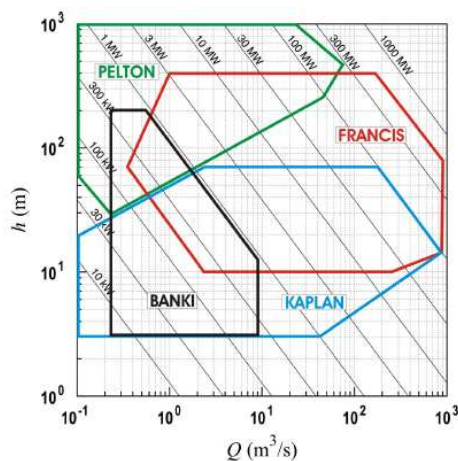


Figura 2.10 - Ábacos para escolha de turbinas [14].

2.4.2 - A energia hídrica em Portugal: Passado, Presente e Futuro

Foi a partir de 1930, com o objectivo do desenvolvimento industrial e económico do país, que emergiram as primeiras ideias para o aproveitamento da energia da água dos rios. Esta estratégia política viria a concretizar-se na prática com a construção dos grandes aproveitamentos hidroeléctricos dotados de albufeira com significativa capacidade de regularização, nas bacias do Cávado e Zêzere, prosseguindo para o Douro.

Em 1970, com a agravada taxa de crescimento dos consumos e na sequência do choque dos preços do petróleo, a produção hidroeléctrica volta a ser alvo de interesse. Nesse contexto, são construídos mais cinco aproveitamentos no troço nacional do Douro. Na década de 90, construiu-se o último grande aproveitamento de raiz - Alto Lindoso - bem como o reforço de potência do aproveitamento de Miranda.

Por outro lado, as preocupações ambientais vieram dificultar a aprovação de projectos hidroeléctricos novos, e, até à data, apenas se realizou a construção do empreendimento do Alqueva, inaugurado em 2004, no rio Guadiana, e o reforço de potência de Venda Nova, com a construção da Central de Frades, entrando em funcionamento em 2005. A figura 2.11 indica a evolução da potência hidroeléctrica em Portugal.

Em Agosto de 2008, a potência instalada no parque electroprodutor do sistema eléctrico nacional era de 14600 MW (dos quais, 4578 MW nas médias e grandes hídricas).

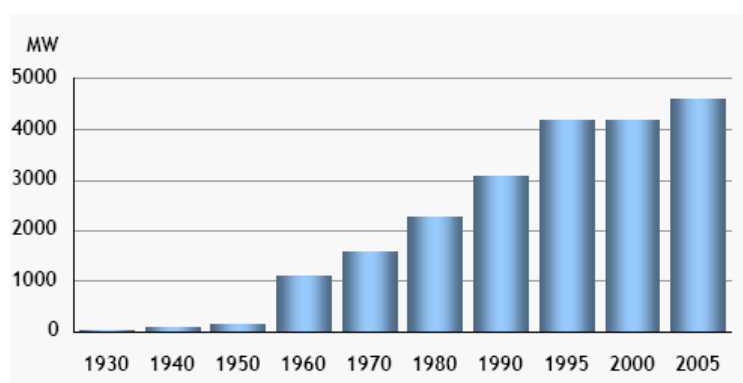


Figura 2.11 - Evolução da potência hidroeléctrica em Portugal [13].

Na tabela 2.2 é apresentado todos os aproveitamentos hidroeléctricos em funcionamento até à data em Portugal.

Tabela 2.2 - Centros produtores hidroelétricos - situação em 01 de Janeiro de 2008.

Sistema	Central	Tipo ⁴	Entrada em serviço	Potência instalada (MW)	Produtibilidade média anual (GWh)
Lima	Lindoso	Alb.	1922	44	7,5
	Alto Lindoso	Alb.	1992	630	933,8
	Touvedo	Alb.	1993	22	66,8
Douro Internac.	Miranda	F.A.	1960	180	868
		F.A.	1995	189	223
	Picote	F.A.	1958	195	941
	Bemposta	F.A.	1964	240	1034
Douro Nacional	Pocinho	F.A.	1983	186	530
	Valeira	F.A.	1976	240	748
	Régua	F.A.	1973	180	682
	Carrapatelo	F.A.	1971	201	882
	Crestuma-Lever	F.A.	1985	117	363
Távora	Vilar-Tabuaço	Alb.	1965	58	148
Tâmega	Torrão	F.A./B	1988	140	254
Cávado	Alto Rabagão	Alb./B	1964	68	95
	Vila Nova	Alb.	1951	90	383,9
		Alb.	1956	54	256,7
	Frades	Alb./B	2005	196	220
	Salamonde	Alb.	1953	42	231,2
	Cançada	Alb.	1954	62	337,4
Homem	Vilarinho Furnas	Alb./B	1972	125	189
Mondego	Agueira	Alb./B	1981	336	256
	Raiva	Alb.	1982	24	44
	Caldeirão	Alb.	1993	40	50
	Sabugueiro	Alb.	1947	22	43
	Ponte Jugais	F.A.	1923	20	40
	Vila Cova	Alb.	1937	23	39
Tejo	Fratel	F.A.	1974	132	382
	Belver	F.A.	1952	81	239
	Sta Luzia	Alb.	1943	25	57
Zêzere	Cabril	Alb.	1954	108	312
	Bouça	Alb.	1955	44	162
	Castelo do Bode	Alb.	1951	159	412
Ocreza	Pracana	Alb.	1950	16	41
		Alb.	1993	25	23
Guadiana	Alqueva	Alb./B	2004	240	269

⁴ F.A. - Fio de água, Alb. - Albufeira, B - Centrais com bombagem

As potencialidades hidroenergéticas que Portugal possui não estão de todos esgotados, encontrando-se numerosos aproveitamentos com viabilidade técnica e económica. Segundo o relatório elaborado pelo consórcio COBA/PROCESL, a pedido do Governo, Portugal é um dos países da União Europeia com maior potencial hídrico por explorar, sendo o que menos cresceu em capacidade hídrica instalada nos últimos 30 anos [15]. Portugal tem, hoje, ainda mais de 50% do potencial hídrico por aproveitar (figura 2.12).

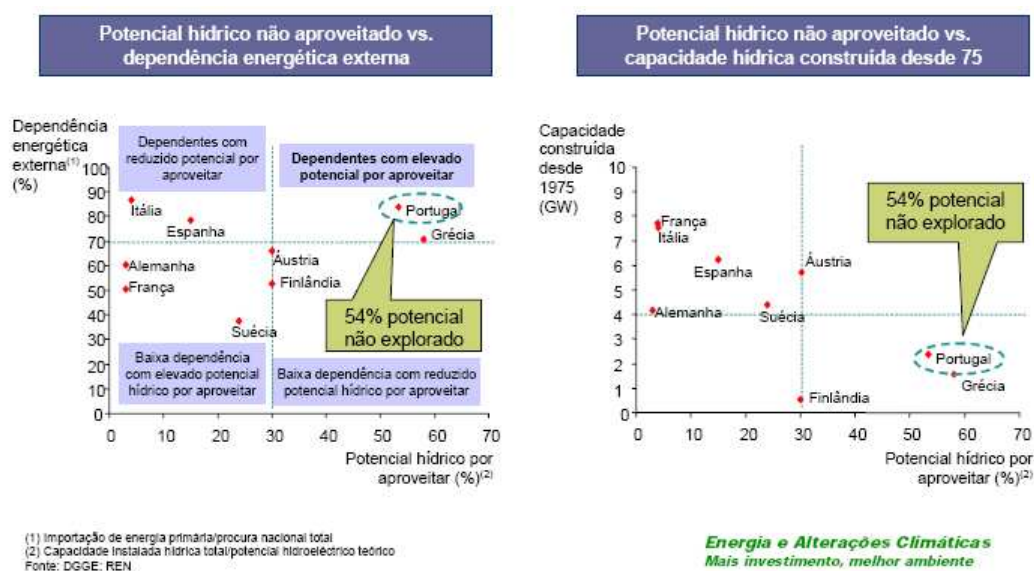


Figura 2.12 - Potencial hídrico: comparação entre países da UE [16].

No projecto aprovado no PNBEPPH, resultou a opção pela construção de 10 novas barragens (tabela 2.3), assegurando-se valores de potência instalada adicional na ordem dos 2000 MW. Estas 10 barragens vêm juntar-se à construção de uma série de aproveitamentos já aprovados pelo Governo, como é o caso da duplicação da capacidade da Central de Alqueva, no Guadiana, cujo reforço trará mais 260 MW. Outras das obras já aprovadas são o reforço de Picote e Bemposta, no Douro, que contribuirão com mais 409 MW; a construção do aproveitamento de Ribeiradio, no Vouga, com 70 MW de potência instalada; e a construção do aproveitamento do Baixo Sabor, na bacia do Douro, com 170 MW de capacidade instalada [15].

Tabela 2.3 - Aproveitamentos hidroelétricos inseridos no PNBEPH (Fonte: www.inag.pt).

Aproveitamentos	Bacia	Rio	Tipo	Potência instalada (MW)	Energia produzida (GWh/ano)
Foz Tua	Douro	Tua	Reversível	234	340
Fridão	Douro	Tâmega	-	163	299
Padrozelos	Douro	Beça/Tâmega	Reversível	113	102
Gouvães	Douro	Torno/Tâmega	Reversível	112	153
Dalvões	Douro	Tâmega	Reversível	109	148
Vidago	Douro	Tâmega	Reversível	90	114
Almourol	Tejo	Tejo	-	78	209
Pinhosão	Vouga	Vouga	Reversível	77	106
Girabolhos	Mondego	Mondego	Reversível	72	99
Alvito	Tejo	Ocreza	-	48	62
TOTAL				1096	1632

2.4.3 - Mini hídricas

O potencial por explorar na área das mini-hídricas⁵ em Portugal não deixa margem para dúvidas. São cerca de 1000 MW, um valor idêntico ao previsto no Plano Nacional de Barragens. Portugal tem cerca de 110 centrais mini-hídricas, no total de 340 MW, concentradas no norte e centro do país. Sá da Costa, presidente da Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN), acredita que “até 2010 poderá atingir-se uma capacidade de 400 MW, mas as dificuldades de licenciamento podem tornar esta meta difícil de atingir”. O processo de licenciamento de uma central mini-hídrica pode demorar até quatro anos, enquanto que a construção chega a atingir dois anos [17]. A figura 2.13 indica a evolução da potência instalada da mini-hídrica onde é notório a estagnação deste tipo de aproveitamento nos últimos anos.

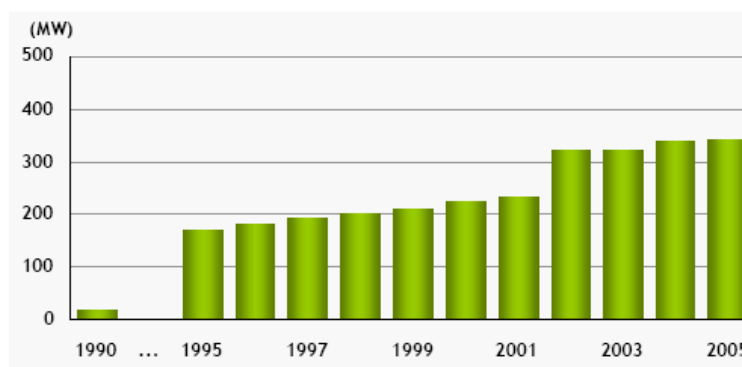


Figura 2.13 - PCH: Evolução da potência instalada [13].

⁵ Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCH)

2.5 - Energia dos oceanos

O maior recurso natural presente na Terra, a água, no ambiente marinho possibilita a extracção de energia nas mais diversas formas.

Actualmente, são conhecidas cinco formas básicas para produção de energia eléctrica a partir dos oceanos ou água doce. As potencialidades energéticas a nível mundial deste recurso e por tipo de aproveitamento são apresentadas na tabela 2.4.

Bastaria pois que se aproveitasse uma parte ínfima deste fantástico recurso para satisfazer todas as necessidades energéticas do planeta, presentes e futuras.

Tabela 2.4 - Potencialidades energéticas mundiais [18].

FORM OF OCEAN ENERGY	ESTIMATED GLOBAL RESOURCES (TWH/YEAR)
Tides	300+
Waves	80 000
Tidal (Marine) Current	800+
Thermal Gradient	10 000
Salinity Gradient	2 000

A energia pode ser extraída a partir das ondas, causadas pela passagem dos ventos através dos oceanos, “concentrando” energia à superfície da água.

As propriedades dos oceanos não são de todo uniformes, tais como a salinidade e a temperatura. Teoricamente, locais relativamente próximos e com características químicas e térmicas distintas podem ver a sua energia extraída; na verdade, é possível, a partir do gradiente de temperatura ou de salinidade, produzir energia eléctrica.

A energia pode igualmente ser extraída a partir dos movimentos das marés, quer sejam pelo desnivelamento resultante das marés - *tidal range* - quer pela deslocação rápida de fluxos e correntes de marés - *tidal stream*. A figura 2.14 resume de forma esquemática as diversas formas de aproveitamento de energia a partir dos mares. Neste trabalho, por opção, apenas iremos fazer uma abordagem sobre a tecnologia da energia das ondas e das marés já que as restantes ou têm expressão reduzida ou são meras hipóteses de investigação.

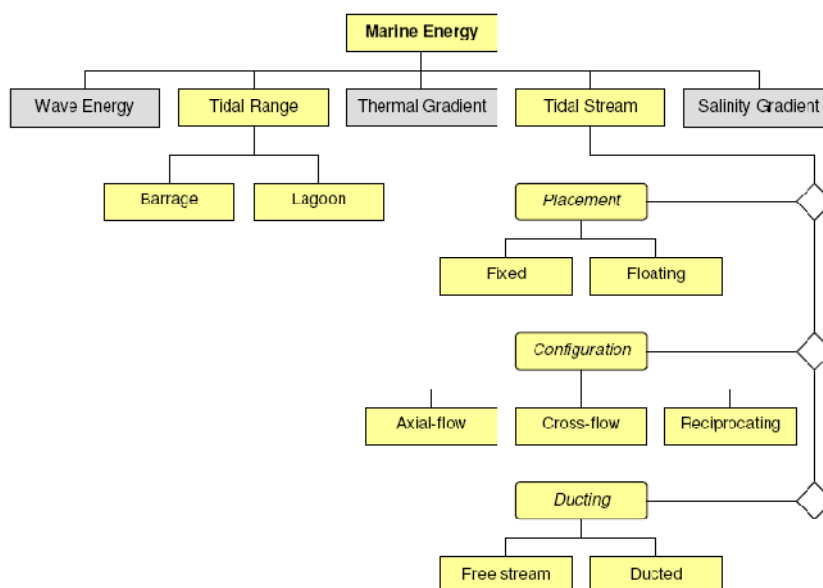


Figura 2 14 - Métodos de extracção da energia dos oceanos [18].

O aproveitamento da energia potencial das marés com recurso às barragens apresenta um desenvolvimento maduro, embora este tipo de tecnologia possa acarretar impactos significativos no ecossistema local. Grande número das tecnologias de aproveitamento da energia das ondas e correntes das marés estão sendo desenvolvidos, e, embora a grande maioria esteja em fase laboratorial, muitos delas encontram-se em escala real, em operação. A tecnologia de aproveitamento da energia térmica dos oceanos (*Ocean Thermal Energy Conversion*, OTEC) está em avançada estado de I&D [18].

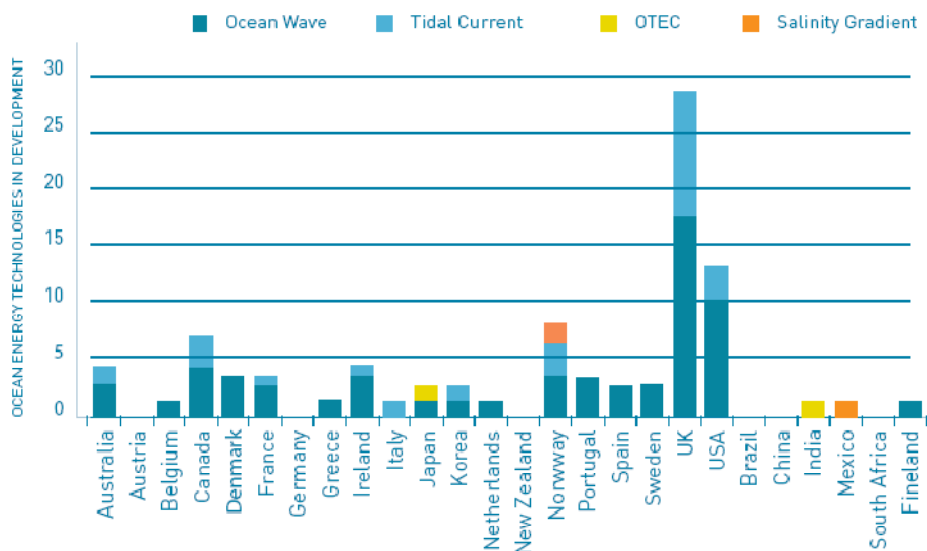


Figura 2.15 - Distribuição mundial das tecnologias de conversão em desenvolvimento [18].

2.6 - Energias das ondas

A conversão da energia cinética “contida” nas ondas em energia eléctrica constitui um impressionante desafio de engenharia e requer o desenvolvimento de novas tecnologias em maior medida. Estudos científicos neste sector tiveram o seu início em 1970, impulsionados em grande parte pela crise petrolífera. Desde então, inúmeras propostas de sistemas de conversão têm sido apresentadas.

O potencial energético das ondas é elevado mas o seu aproveitamento choca com a dificuldade de transformar movimentos lentos e oscilantes em movimentos rotativos contínuos (para geradores convencionais). Diferentes soluções são apresentadas para procurar responder ao desafio tecnológico que a extracção de energia das ondas impõe [20]. Contudo, apenas alguns protótipos têm sido objecto de estudo e têm sido demonstrados em larga escala [18].

A diversidade dos dispositivos em relação ao seu tipo de conversão, potência, movimento e localização, entre outros, levou à necessidade de estabelecer um conjunto de critérios de classificação das diferentes tecnologias. A maior parte das referências bibliográficas neste domínio adopta como critério de classificação a distância à costa do dispositivo, agrupando-os desta forma em [21]:

- dispositivos costeiros (na nomenclatura inglesa: *shoreline*);
- dispositivos próximos da costa (*near-shore*);
- dispositivos afastados da costa (*offshore*).

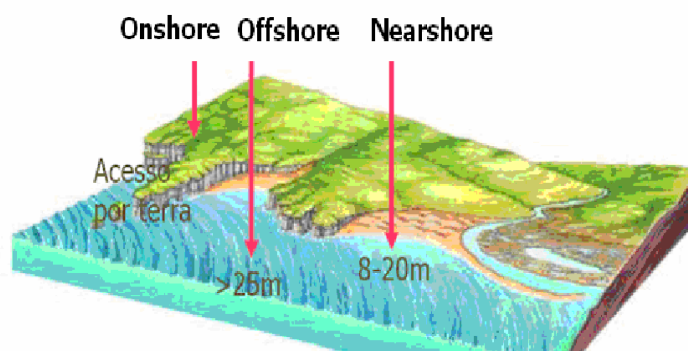


Figura 2.16 - Classificação do tipo de tecnologia em relação à distância à costa [20].

Repare-se que o factor preponderante é a profundidade evidenciada a essa distância (ver figura 2.16) e não o valor da distância à costa em si. De facto, o potencial energético de uma onda é tanto maior quanto mais afastado estiver da costa, pelo que haverá vantagens na colocação dos dispositivos em profundidades superiores [21].

É também possível efectuar a classificação de acordo com o modo de conversão de energia, isto é, ao tipo de dispositivo. No entanto, as duas classificações podem ser associadas de forma coerente e lógica, pelo que apenas iremos abordar a segunda, sempre que se justificar.

2.6.1 - Potencial do recurso a nível mundial e o caso Português

O potencial da energia das ondas apresenta-se particularmente atractiva para ilhas ou países com grandes extensões junto à faixa costeira, pelo que, após o choque petrolífero, em 1973, países que reuniam condições geográficas propícias a esta tecnologia elegeram a energia das ondas em programas de carácter governamental ou em instituições de investigação e desenvolvimento. Como exemplos, temos os casos do Reino Unido, Noruega, Dinamarca, Suécia e Portugal, os EUA, a China, a Índia e o Japão [21].

O recurso global atribuído à energia das ondas ronda os 2 TW, sendo assim equiparável à potência eléctrica média anual necessária para garantir os consumos mundiais. O recurso energético das ondas encontra-se exemplificado na figura 2.17, onde o potencial de cada zona é representado em kW por metro de frente de onda.

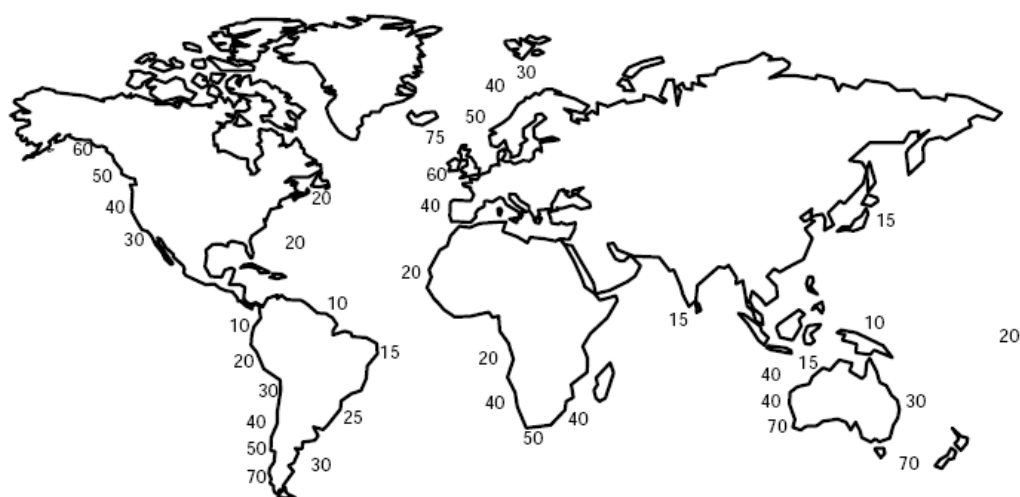


Figura 2.17 - Distribuição do potencial mundial das ondas em kW/m de frente de onda [18].

Estes valores representam o fluxo médio anual de energia que atravessa cada metro de frente de onda e são variáveis, podendo atingir, em estados de tempestade, 1 MW/m. O recurso energético das ondas na Europa representa cerca de 16% do mundial, contabilizando assim 320 GW. Em Portugal estão "disponíveis" 21 GW, distribuídos entre 15 GW para o continente e 6 GW para as Regiões Autónomas. Mesmo sendo extremamente conservadores nas taxas de conversão da energia disponível, facilmente concebemos que este recurso constitui uma mais valia para Portugal, que se encontra ainda por explorar [21].

2.6.2 - Formas de aproveitamento: tecnologia

Um grande número de diferentes conceitos de aproveitamento da energia das ondas está actualmente em fase de investigação e desenvolvimento. O pouco amadurecimento desta tecnologia, comparada com as anteriormente citadas, tem levado à falta de uma

consensualização relativamente à melhor tecnologia a aplicar, apesar de cada vez mais se caminhar para uma convergência de ideias num futuro próximo.

Embora muitos modelos de trabalhos tenham sido desenvolvidos, bem como experiências laboratoriais, apenas alguns conceitos têm evoluído e sido alvo de teste em grande escala, no alto-mar [18].

A tabela 2.5 e as figuras 2.18 e 2.19 ilustram, de forma sintética, os principais tipos de dispositivos actualmente existentes, agrupados de acordo com a sua classificação de instalação relativamente à costa.

Tabela 2.5 - Características e equipamentos existentes por tipo de instalação no mar [21].

Tipologia	Dispositivos	Vantagens	Desvantagens
<i>OnShore</i>	OWC (Oscillating Wave Column); Tapchan; Pendulor	Facilidade de instalação e manutenção; Ausência de grandes extensões de cabos submarinos; Tecnologia disponível e madura.	Potencial energético das ondas inferior;
<i>OffShore</i>	Pelamis; AWS - Archimedes Waves Swing; Wave Dragon; Salter Duck; PAWEC; MWP	Potencial energético elevado; Possibilidade de desenvolvimento de outros tipos de indústria (ex: construção naval);	Custos de construção e operação elevados; Limitações técnicas;
<i>NearShore</i>	OSPNEY (Ocean Swell Powered Renewable Energy)	-	-

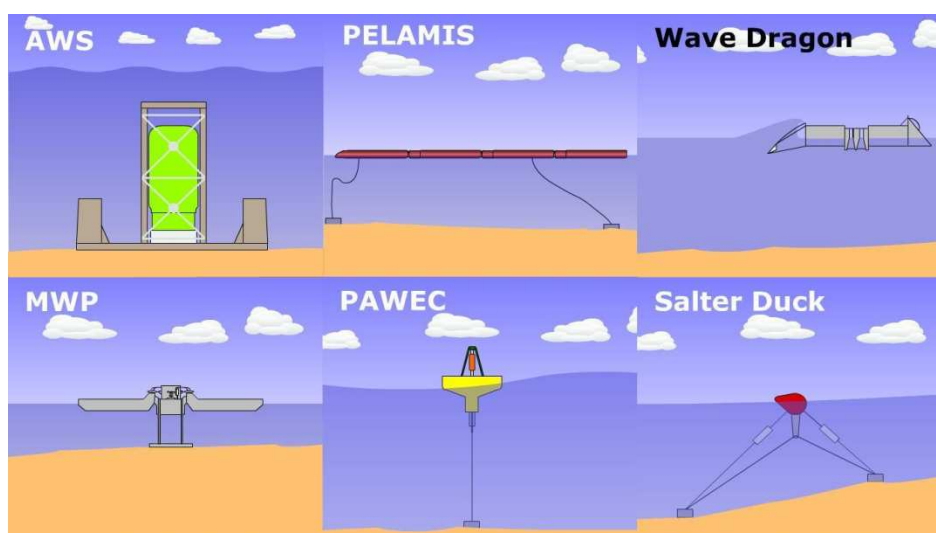


Figura 2.18 - Principais dispositivos de tipologia OffShore (Fonte: www.energiasrenovaveis.com).

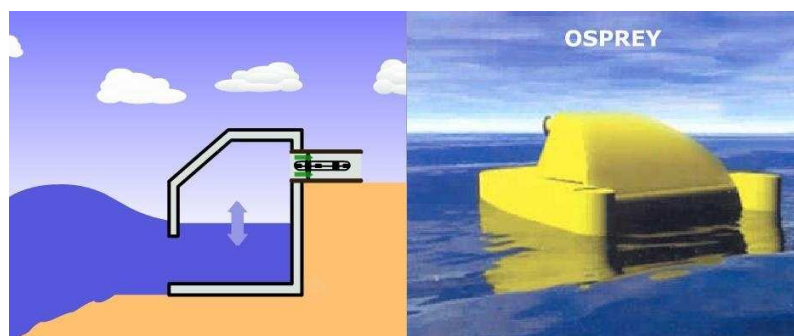


Figura 2.19 - Dispositivo do tipo *OnShore* (esq.) e *NearShore* (dir.) (Fonte: www.energiasrenovaveis.com).

2.6.3 - Situação actual e perspectivas futuras

O interesse crescente a nível internacional sobre a temática da energia das ondas tem permitido “alavancar” o desenvolvimento deste tipo de aproveitamento, estando na actualidade diversas centrais piloto de diferentes tipos em teste no mar ou em elevada fase de desenvolvimento.

Portugal também tem contribuído para a fase experimental de vários projectos, contando com uma instalação do tipo costeira (Pico), uma offshore (Póvoa de Varzim) e, mais recentemente, com a conclusão da instalação de três máquinas Pelamis, na praia da Aguçadoura, perfazendo 2,25 MW. O projecto prevê uma segunda fase com uma capacidade adicional de 20 MW, equivalente à instalação de mais 27 máquinas Pelamis [22].

Os chamados sistemas *OffShore* são particularmente vocacionados para a extracção de energia em larga escala, através da sua instalação em parques (análogos aos parques eólicos), pelo que são aqueles onde a investigação recente tem focado a sua atenção, embora a tecnologia mais estudada seja a de Coluna de Água Oscilante para aplicação na linha de costa [21].

Portugal apresenta condições favoráveis ao aproveitamento energético das ondas: recurso energético médio-alto, águas relativamente profundas a pouca distância da costa, portos e estaleiros com boa localização e rede eléctrica de transporte junto à costa. “Um documento recente, o PNEO de 2004, visa esboçar uma estratégia nacional para a energia das ondas, salientando os pontos fortes e fracos da actual situação nacional nesta temática e evidenciando as oportunidades, bem como dificuldades, na concretização dos objectivos nacionais nesta área”. A tabela 2.6 resume os principais pontos de discussão e comentados em [21].

Tabela 2.6 - Pontos fortes e fracos no caso Português (Fonte: PNEO).

Pontos Fortes	Pontos Fracos
Existência de mercado	Riscos inerentes a uma tecnologia em desenvolvimento
Condições naturais e estruturais	Falta de experiência em inovação tecnológica
Capacidade científica	Pouca disponibilidade das empresas portuguesas para investimento nesta área
Capacidade tecnológica e industrial	Imagem pouco favorável dos primeiros sistemas
Política governamental favorável	Barreiras técnicas (agressividade do recurso)
Exigências comunitárias no âmbito das energias renováveis	Complexidade e demora dos processos de licenciamento

2.7 - Energias das marés

A influência da Lua e do Sol sobre a Terra, resultante da interacção dos campos gravitacionais, provoca um dos fenómenos mais interessantes no que diz respeito à movimentação da água: as marés (figura 2.20). A energia das marés deriva do movimento das águas nos oceanos [19]. Os campos gravitacionais criam periodicamente e duas vezes ao dia o crescimento e descida da altura do mar (maré vaza quando o nível desce e maré cheia quando o nível sobe). De uma forma geral, podemos dizer que a maré sobe quando das passagens meridianas superior e inferior da Lua, repetindo-se periodicamente com um intervalo médio de meio-dia lunar (aproximadamente 12,25 h) [23].

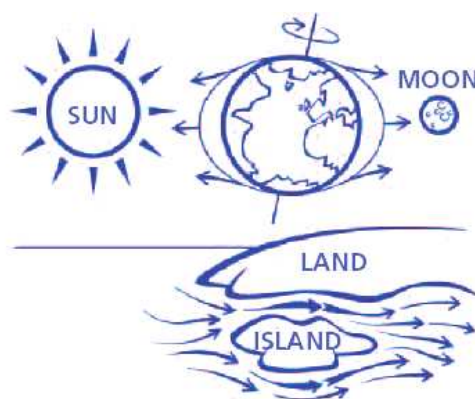


Figura 2.20 - Interacção Terra, Sol e Lua [24].

O potencial energético das marés em termos mundiais é estimado em cerca 3 TW. Na Europa, em alguns países como a França e Reino Unido, registam-se variações médias no nível das marés de cerca de 10 metros. Para além destes, o Canadá, Argentina, Austrália e a Coreia apresentam potenciais locais de aproveitamentos alvos de estudo. Alguns locais de excepção apresentam variações no nível das marés superiores, como é possível ver na tabela 2.7, onde se indicam, a título de curiosidade, os locais onde se registam as maiores amplitudes do nível das marés.

Tabela 2.7 - Maiores amplitudes de marés a nível mundial [25].

<i>Country</i>	<i>Site</i>	<i>Tide range (m)</i>
Canada	Bay of Fundy	16.2
England	Severn Estuary	14.5
France	Porto of Ganville	14.7
France	La Rance	13.5
Argentina	Puerto Rio Gallegos	13.3
Russia	Bay of Mezen (White Sea)	10.0
Russia	Penzhinskaya Guba (Sea of Okhotsk)	13.4

Estudos recentes indicam que as correntes das marés têm potencial para satisfazer as necessidades futuras energéticas [26]. Só na Europa, este tipo de aproveitamento tem uma estimativa de 12000 MW de capacidade instalável. Locais com intensas correntes de marés situam-se nas Ilhas Britânicas e Irlanda, França, no estreito de Messina, entre a Sicília e Itália, bem como em alguns canais das ilhas gregas.

2.7.1 - Formas de aproveitamento

A movimentação das águas que flui através de canais e à volta de outras massas terrestres podem ser acelerados, resultando em fluxos mais rápidos, ou crescimento ou descida do nível da água - *tidal range*. O aproveitamento do fluxo das marés - *tidal stream* - ocorre usualmente em canais e à volta de *headlands*, ocorrendo mesmo onde o nível da água não se altera. Por outro lado, muitos dos aproveitamentos que exploram a energia potencial das marés situam-se nas bacias ou estuários [19]. De forma geral, o aproveitamento da energia das marés pode ser realizado de duas formas diferentes, designados, na literatura anglo-saxónica, por: *tidal range* e *tidal stream*. A figura 2.21 ilustra 3 formas possíveis de aproveitamento de energia das marés.

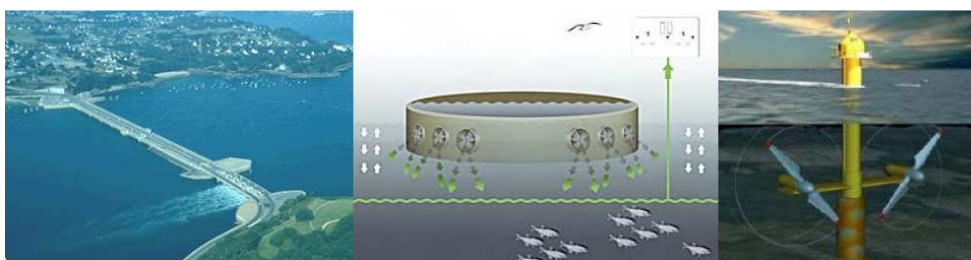


Figura 2.21 - Tidal barrage (esq.), tidal lagoon (centro) e tidal stream (dir.) [19].

Segundo [19], as definições para estes dois tipos de aproveitamento são:

- **Tidal range:** tecnologia que explora a diferença do nível da água, resultante das marés.
- **Tidal stream:** tecnologia que explora a movimentação da água, normalmente em canais ou em zonas costeiras.

Nos aproveitamentos do primeiro tipo, a energia potencial associada à força das marés pode ser aproveitada com recurso à construção de uma barragem fixa ou móvel, quer em alto mar ou no próprio estuário do rio. A energia das marés é predominante em determinados locais, devido às suas características geográficas e formação de marés únicas. Quando são utilizadas barragens, como o nível da água sobe e desce devido às marés, é criado uma diferença no nível da água em ambos os lados da barragem e a água é forçada por forças

gravitacionais a circular através da barragem, accionando turbinas e produzindo, deste modo, energia eléctrica.

O primeiro projecto à escala comercial foi instalado em La Rance, França, em 1960. No mundo, apenas foram identificados 20 locais com potencial de aproveitamento, e actualmente, a França é o único país bem sucedido com o aproveitamento das marés por barragem [27]. Outras barragens de menor envergadura foram instaladas no Canadá, China e Rússia (tabela 2.8).

Tabela 2.8 - Unidades produtoras de energia das marés [25].

<i>Country</i>	<i>Site</i>	<i>Installed power (MW)</i>	<i>Basin área (km²)</i>	<i>Mean tide (m)</i>
France	La Rance	240	22	8.55
Russia	Kislayskaya	0.4	1.1	2.3
Canada	Annapolis	18	15	6.4
China	Jiangxia	3.9	1.4	5.08

O aproveitamento com recurso à construção de uma lagoa tem os princípios idênticos a uma barragem convencional, tendo por objectivo “captar” água. A única diferença é o facto de estas não abrangerem toda a largura do rio mas apenas uma parte. Não existem até à data, construções deste género [19].

A energia cinética presente nas correntes das marés pode ser aproveitada utilizando uma turbina semelhante às empregues nas turbinas eólicas. Estes dispositivos apresentam dimensões menores e podem ser instalados individualmente ou em grupo, constituindo sistemas submersos, fixos ou flutuadores. Esta tecnologia está actualmente a emergir e inúmeros protótipos estão em fase de desenvolvimento [19].

2.7.2 - Tecnologia das marés

A tecnologia de aproveitamento de energia das marés com recurso às barragens não é de todo recente, contudo, apenas alguns locais no mundo reúnem as condições desejáveis para este tipo de infra-estruturas, tal como já foi dito. No entanto, as questões ambientais, nomeadamente as que dizem respeito à conservação da biodiversidade, têm sido um dos principais entraves à sua expansão.

Relativamente aos dispositivos que aproveitam a energia cinética das marés, muitos desafios se têm manifestado. De facto, este tipo de tecnologia só pode ser instalado em ambiente offshore, criando limitações à sua exploração tal como offshore eólico. Devido ao pouco amadurecimento desta tecnologia, há actualmente um vasto conjunto de protótipos em fase ainda experimental, não se sabendo, a longo prazo, qual será o mais bem sucedido.

Actualmente e na literatura anglo-saxónica, a classificação destes dispositivos pode ser realizada de acordo com a configuração do rotor adoptada (figura 2.22):

- Horizontal axis
- Vertical axis
- Reciprocating hydrofoil

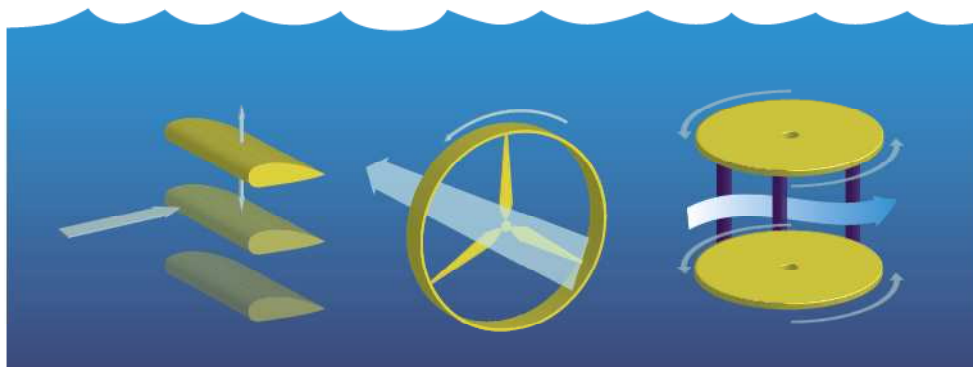


Figura 2.22 - *Tidal stream*: possibilidades de configuração do rotor [19].

Por outro lado, estes dispositivos podem ser classificados de acordo com a sua instalação, os quais podem ser fixos, submersos ou flutuantes. Podem também ter uma configuração, adoptando um ducto que tem por objectivo concentrar os fluxos das marés para o rotor.

Um dos melhores diferenciadores destes dois tipos de aproveitamentos é o custo envolvido de produção de energia eléctrica. Este inclui os custos de construção, planeamento, operação, manutenção entre outros.

2.7.3 - Situação actual e perspectivas futuras

Os diferentes graus de amadurecimento tecnológicos dos aproveitamentos de energia dos oceanos são mostrados na figura 2.23. O aproveitamento da energia das marés com recurso às barragens já se encontra bastante desenvolvida; actualmente e já numa fase comercial encontram-se em operação unidades com potências instaladas superiores a 240 MW, designadamente em França. Paralelamente, novas iniciativas para esta aplicação estão em progresso na China, Coreia, Índia, México e Reino Unido [28], como já se havia indicado na tabela 2.8.

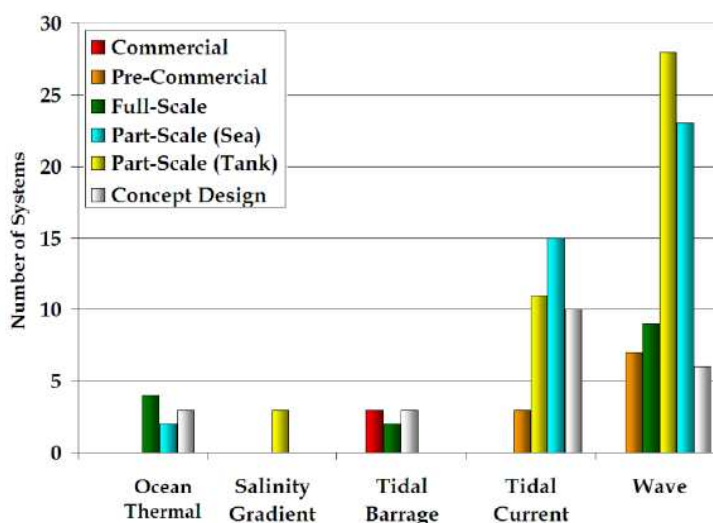


Figura 2.23 - Estado de desenvolvimento das várias tecnologias de energia dos oceanos [28].

Muitos protótipos de geradores são actualmente propostos e o menor impacte ambiental e os menores custos tornam-nos numa alternativa. O primeiro protótipo mundial a produzir comercialmente electricidade, o SeaGen, foi instalado a 20 de Agosto de 2007 em Strangford Lough, na Irlanda do Norte. Este produz 1,2 MW, fornecendo o suficiente para abastecer mil residências. A Marine Current Project (MCP), autora desta infra-estrutura, projecta, em parceria com o produtor de energia Npower, pensa instalar uma “quinta” de sete SeaGen ao largo de d’Anglesey (Noroeste do País de Gales) que possa produzir mais de 10 MW, em 2012. Em Portugal, mais concretamente em Peniche, foi instalado um protótipo de aproveitamento da energia das marés do tipo oscilador. Este dispositivo foi desenvolvido pela Finish Company AW-Energy, prevendo-se que, em 2008, se possa atingir 1 MW de potência instalada [18]. Em [18] é feita uma avaliação do estado de penetração destas tecnologias, para 23 países a nível mundial.

Hoje em dia, mais de 26 países estão envolvidos no desenvolvimento relevante desta tecnologia (ver figura 2.15), mostrando uma clara evidência no estado de desenvolvimento actual de cada um dos 5 tipos de aproveitamentos.

As políticas nacionais poderão dar uma contribuição importante para o acelerar desta nova oportunidade, sendo o Reino Unido, de longe, o país com o maior número de companhias em operação neste sector. A estratégia de Portugal criou condições atractivas que facilitam o desenvolvimento para a indústria no sector da energia das ondas, incluindo tarifas de aquisição e uma zona piloto de grande escala com procedimentos simplificados de licenciamento.

2.8 - Energia da Biomassa

A Biomassa é o termo geral utilizado para designar os materiais derivados de plantas ou resíduos de origem animal. A Bioenergia refere-se por sua vez aos sistemas técnicos através dos quais a biomassa é produzida ou recolhida, convertida e utilizada como fonte de energia. A distinção entre a variedade de formas de energia pode ser feita, quer seja no estado sólido, líquido ou gasoso. Estas destinam-se aos mais variados tipos de mercados: calor, electricidade e transportes [29].

Na Europa, são as indústrias transformadoras da madeira (fábricas da pasta de papel) que ao queimarem os seus resíduos, produzem calor e electricidade - cogeração. De facto, melhores rendimentos são obtidos na produção combinada, aumentando assim a eficiência de 30-50 % de uma unidade convencional para 80-90 % de um sistema de cogeração.

As necessidades simultâneas de electricidade e calor tornam particularmente interessante a utilização da biomassa, que é então utilizada para a produção destas duas formas de energia em simultâneo [30].

A biomassa é caracterizada geralmente pelo seu baixo teor em cinzas e a sua quase ausência de enxofre. Além disso, o CO₂ emitido pela combustão da biomassa é reabsorvido pelas plantas através do processo de fotossíntese, constituindo um processo cíclico. Deste modo, não é adicionado CO₂ àquele existente na biosfera, contrariamente ao carbono proveniente de combustíveis fósseis (figura 2.24).

A Bioenergia representa actualmente uma das maiores fontes de origem renovável a nível mundial, considerando-se que esta tem o potencial de proporcionar a longo prazo uma grande percentagem das necessidades energéticas. Ao mesmo tempo, se os sistemas de Biomassa forem devidamente geridos, a Bioenergia contribuirá para dar resposta às necessidades de redução das emissões gasosas.

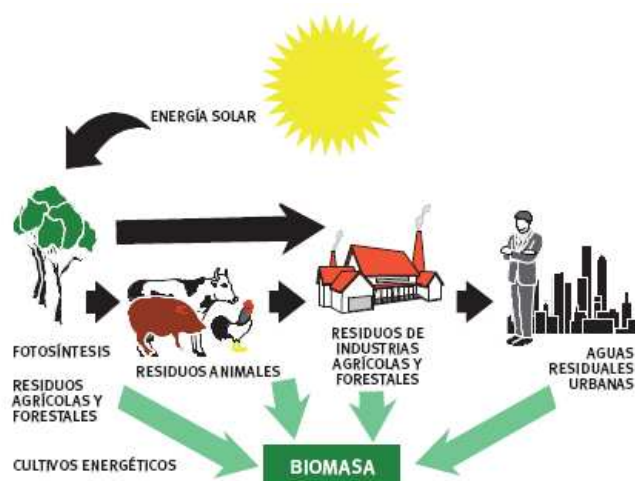


Figura 2.24 - Produção da Biomassa [29].

2.8.1 - Formas de aproveitamento

Existem inúmeras opções tecnológicas disponíveis para fazer uso da ampla variedade de tipos de biomassa como fonte de energia renovável.

As tecnologias de conversão podem converter a energia directamente, na forma de calor ou electricidade, ou noutras formas, tais como o biogás ou combustíveis líquidos (biocombustível).

Os recursos da biomassa podem ser classificados em função da oferta do sector, como ilustra a tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Origem da Biomassa - Classificação por sector [29].

Sector	Tipo	Exemplo
Florestal	Floresta dedicada	Salgueiro, álamo, eucalipto, ...
	Subprodutos florestais	Blocos de madeira, raspas de madeira (desbastes)
Agricultura	Lenhocelulósico seco	Culturas herbáceas
	Óleo, açúcar, amido	Sementes de oleaginosas, cultivo de açúcar e amido
	Resíduos agrícolas	Palha, podas de árvores frutíferas e vinhedo
	Resíduos animais	Esterco
Indústria	Resíduos industriais	Resíduos de madeira ou vegetais fibrosos (ind. do papel)
Doméstico	Lenhocelulósico seco	Resíduos de parques e jardins (erva, galhos, etc...)
	Resíduos contaminados	Madeiras, resíduos sólidos urbanos, esgotos, ...

É possível distinguir-se 4 categorias de tecnologias de conversão da biomassa: Combustão directa, processo termoquímico (pirólise, gaseificação), processo bioquímico (digestão anaeróbia, fermentação) e físico-químico (para produção de biodiesel). A conversão térmica é um processo no qual o calor é o mecanismo dominante para conversão da biomassa noutra forma química. A aplicação mais conhecida deste processo é a cogeração.

A conversão bioquímica faz uso das enzimas de bactérias e outros microorganismos para “quebrar” a biomassa. Na maioria dos casos, os microorganismos são utilizados para realizar o processo de conversão: digestão anaeróbia, fermentação, compostagem. Outro processo também importante é a transesterificação, muito utilizado na produção de biodiesel. A biomassa/bioenergia pode ser classificada de acordo com a sua utilização final pela seguinte forma (ver figura 2.25)

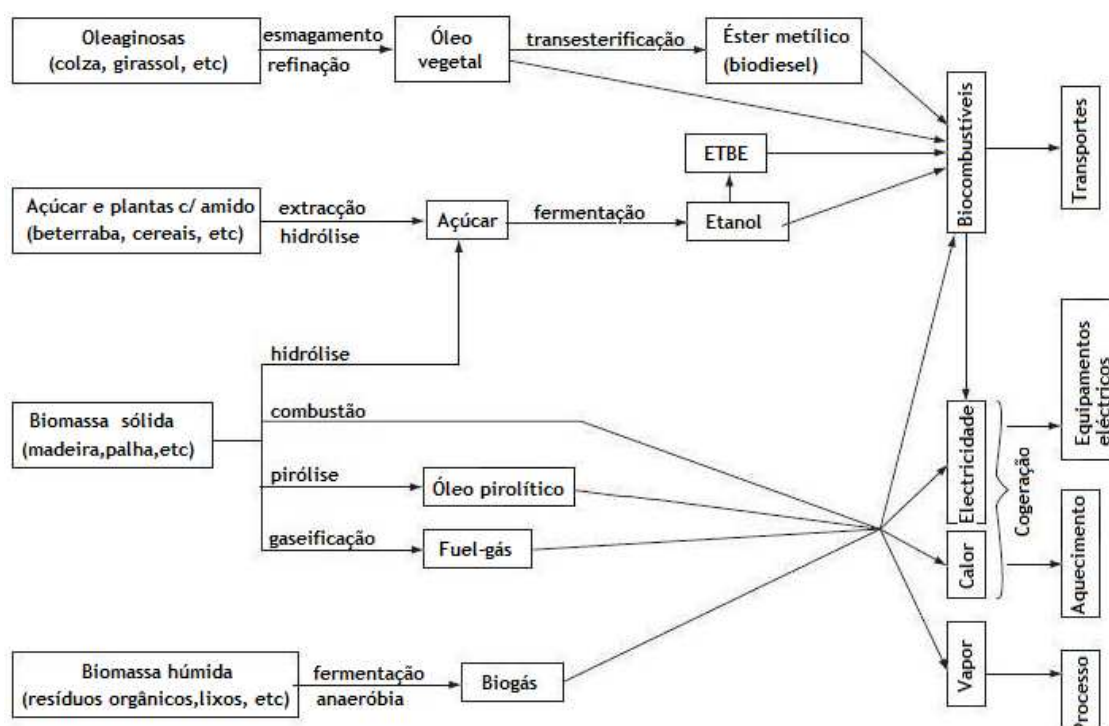


Figura 2.25 - Processos de conversão da Biomassa [31].

Os elementos primários de biomassa podem ser transformados pelas diferentes tecnologias de conversão em biocombustíveis sólidos, líquidos ou gasosos e, finalmente, nos produtos energéticos finais - energia térmica, mecânica e eléctrica.

A biomassa pode ser convertida em energia eléctrica através de vários processos. A maioria das centrais de biomassa, são operadas usando um ciclo de vapor: a Biomassa é queimada numa caldeira de forma a produzir vapor, que vai accionar uma turbina. O processo de combustão, seguido de um ciclo a vapor, é pois a tecnologia mais usual para produção de electricidade [31].

A biomassa também pode ser queimada em conjunto com carvão (combustão conjunta) diminuindo assim as suas emissões. Outro processo é a conversão da biomassa sólida em gás. Através de um gaseificador, este biogás pode ser queimado através do acondicionamento de

uma turbina a gás, existindo a possibilidade de utilização de ciclo combinado, para obter maior rendimento.

As microturbinas podem constituir uma opção vantajosa para produção distribuída de electricidade e calor, devido à sua simplicidade, ao facto de serem uma tecnologia já amadurecida e devido às suas reduzidas emissões. Comparando com as turbinas convencionais, apresentam uma potência mais reduzida (normalmente até 200 kW), um ciclo de combustão simplificado, uma menor taxa de compressão e um eixo de rotor de reduzidas dimensões, com o gerador montado numa das extremidades. Este grupos podem adaptar-se para funcionarem com diferentes tipos de combustíveis, sem quaisquer modificações significativas a realizar.

2.8.2 - Situação actual e perspectivas futuras

Na Europa dos 27, a bioenergia apenas contribui com 3,7 % do fornecimento total de energia primária; contudo desempenha um papel considerável em alguns países da Europa, tais como Finlândia e Suécia, onde o seu contributo ascende respectivamente a 20 % e 16 % do consumo interno bruto [29].

A elevada disponibilidade de matéria-prima, tal como a madeira e resíduos provenientes das indústrias de papel e celulose, permitiu o seu rápido crescimento, tal como na Suécia, Finlândia e Áustria. Portugal, Espanha, Alemanha e outros países estão neste momento a desenvolver programas para o uso da biomassa [32]. Os principais obstáculos ao desenvolvimento da tecnologia da biomassa podem dizer respeito ao abastecimento de matérias-primas. O custo de produção, colheita e transporte constitui um avultado investimento.

Em Portugal, a produção eléctrica a partir da biomassa não tem registado avanços significativos, registando-se apenas 24 MW instalados em 2007 (figura 2.26). As novas metas definidas para 2010 apontam para uma capacidade instalada de 250 MW. Actualmente, existem em Portugal duas centrais termoeléctricas ligadas à rede eléctrica que utilizam Biomassa Florestal como principal combustível: a central da EDP, em Mortágua (9 MW), e a Centroliva, em Vila Velha de Rodão (13,2 MW). Existem ainda nove centrais de cogeração instaladas nas indústrias do sector florestal que fazem aproveitamento de biomassa para produção de calor [32].

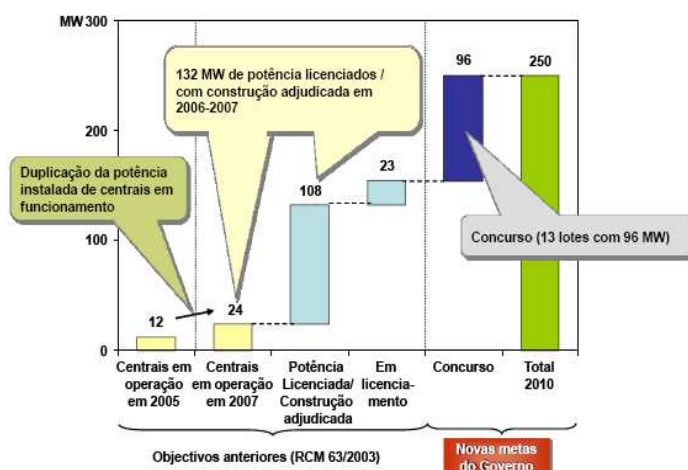


Figura 2.26 - Potência total disponível para centrais de Biomassa florestal.

Em 2006, fora lançado o concurso para 15 novas centrais a biomassa florestal, representando um adicional de 100 MW. A localização das futuras centrais (figura 2.27) foi pré-seleccionada tendo em conta a disponibilidade de Biomassa Florestal e o risco estrutural de incêndio [32]. Deste modo, foram privilegiadas duas tipologias de centrais:

- Até 12 MW, permitindo economias de escala na produção de energia eléctrica e garantindo um maior raio de recolha de biomassa florestal;
- Até 6 MW, permitindo o desenvolvimento de unidades locais de pequena dimensão numa óptica de desenvolvimento local.

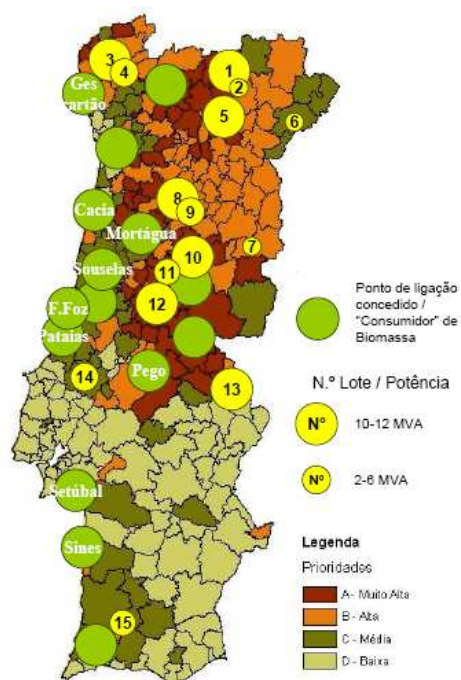


Figura 2.27 - Rede de centrais de Biomassa [33].

Relativamente aos biocombustíveis, a Comissão Europeia (CE) já formulou uma proposta para uma nova Directiva (Janeiro de 2008) onde se pretende alcançar, até 2020, 10% de utilização de biocombustíveis nos transportes. Em Portugal, no ano de 2007, encontravam-se em funcionamento 4 empresas produtoras de biodiesel com capacidade de produzir 365 mil toneladas. São conhecidos mais 5 projectos de investimento de biodiesel e 2 de bioetanol. Merece destaque o investimento da Galp, que pretende desenvolver produção de biodiesel em Matosinhos e em Sines [34].

Foi definido em Resolução de Conselho de Ministros (RCM nº 63/2003) a meta de 50 MW de potência instalada com origem no aproveitamento do biogás, até 2010. Estas medidas, aliadas à construção de novos sistemas de ETAR's e tratamentos de RSU, integrados em estratégias ambientais e de conservação dos recursos hídricos, poderá potenciar novos empreendimentos de aproveitamento energético do biogás em Portugal.

2.8.3 - Resíduos Sólidos Urbanos e os Biocombustíveis

Uma análise ao Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU) permitiu concluir que o destino dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), nos últimos 10 anos, deixou de ser maioritariamente a deposição em lixeiras (73% em 1995) para passar a ser deposição em aterro (63% em 2005).

Verificou-se, ainda, a implementação da incineração com recuperação de energia eléctrica, que, em 2005, constituiu o destino final de 21% dos resíduos produzidos. A incineração de RSU é uma realidade em Portugal desde 1999, estando presentemente em funcionamento duas instalações de grande capacidade (Valorsul - Lisboa e Lipor - Porto) e uma de menor dimensão na ilha da Madeira (Valor Ambiente - Meia Serra).

Actualmente, Portugal assiste a uma mudança de paradigma no que concerne à gestão de resíduos, passando de uma situação em que o destino destes era maioritariamente o aterro (a valorização energética apresenta alguma expressão, mas apenas decisiva nas grandes áreas urbanas de Lisboa e Porto), para uma situação em que se assiste a um crescente esforço de reciclagem e, simultaneamente, se avança para uma maior representatividade da valorização orgânica [35].

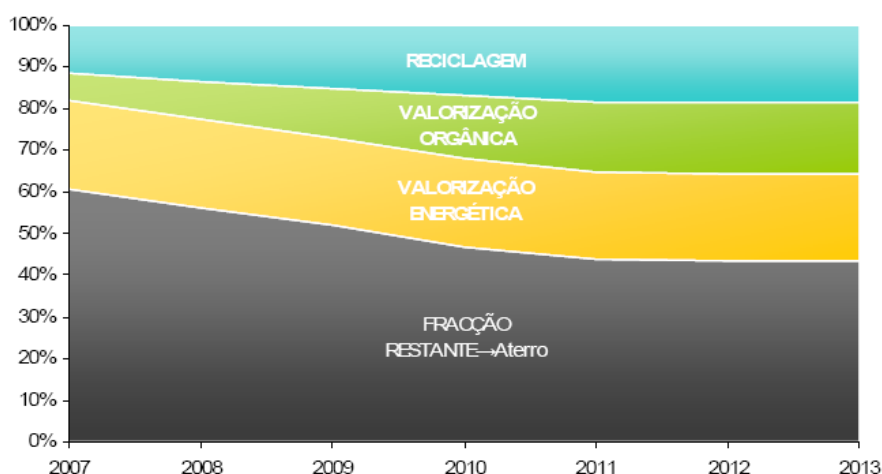


Figura 2.28 - Soluções previstas para o tratamento e gestão dos RSU no período 2007-2013 [35].

De acordo com o quantitativo de resíduos expectável para o período 2007-2013 (figura 2.28) verifica-se que existe uma fracção destinada à valorização energética de RSU assegurada pelas duas centrais de valorização energéticas de resíduos existentes em Portugal Continental, acima referidas.

Por outro lado, a tendência de crescimento que os resíduos sólidos vêm a verificar poderá beneficiar diversas indústrias no sector industrial. Destacam-se as cimenteiras, as centrais termoeléctricas, a indústria do papel, pasta e cerâmicas, bem como outras unidades de cogeração. No entanto, um estudo realizado por [35] permite demonstrar uma posição reticente das empresas do sector da produção eléctrica quanto à integração dos resíduos sólidos nas suas unidades num cenário a curto prazo. As principais razões apontadas devem-se sobretudo a aspectos técnicos que envolvem investimentos económicos (para adaptação de equipamentos), aspectos legislativos, relacionadas com metas definidas quanto às emissões gasosas, bem como a aspectos burocráticos inerente ao uso destes produtos, as quais são muitas vezes inibidora da sua utilização.

Embora estejam a ser encarados como uma alternativa possível aos combustíveis fósseis, actualmente a maioria dos biocombustíveis disponíveis para motores têm custos de produção por unidade de energia produzida mais elevados do que os combustíveis derivados do petróleo. Para que os custos destes combustíveis venham a descer serão necessários importantes desenvolvimentos e investimentos governamentais, de forma a melhorar a produção e a tecnologia de distribuição.

Os biocombustíveis incluem um número considerável de diferentes produtos e muitas formas de produção. O biocombustível mais utilizado, o etanol, é actualmente produzido, em grande parte, nos EUA (o maior produtor mundial em 2006, com 36%), Brasil (33,3%) e China (7,5%). No entanto, o maior produtor de biodiesel é a Alemanha (com 40,8%), onde o combustível é produzido a partir de colza.

A directiva comunitária 2003/30/CE define uma quota de 5,75% de biocombustíveis em substituição da gasolina e do gasóleo no sector dos transportes, até final 2010. Em Janeiro de 2008, a Comissão Europeia apresentou uma proposta de incremento para 10% em 2020. Em 2005, a Alemanha foi o país da União Europeia com maior índice de incorporação de biocombustíveis nos transportes (3,75%).

Em Portugal, a incorporação de biodiesel ascendeu a 190 mil toneladas, sendo a Galp a principal distribuidora de biocombustíveis. Os investimentos realizados no sector dos biocombustíveis prevêm mais 5 projectos para o biodiesel e 2 de bioetanol, para além dos existentes, como já referido. A figura 2.29 ilustra a localização geográfica destas unidades produtoras.

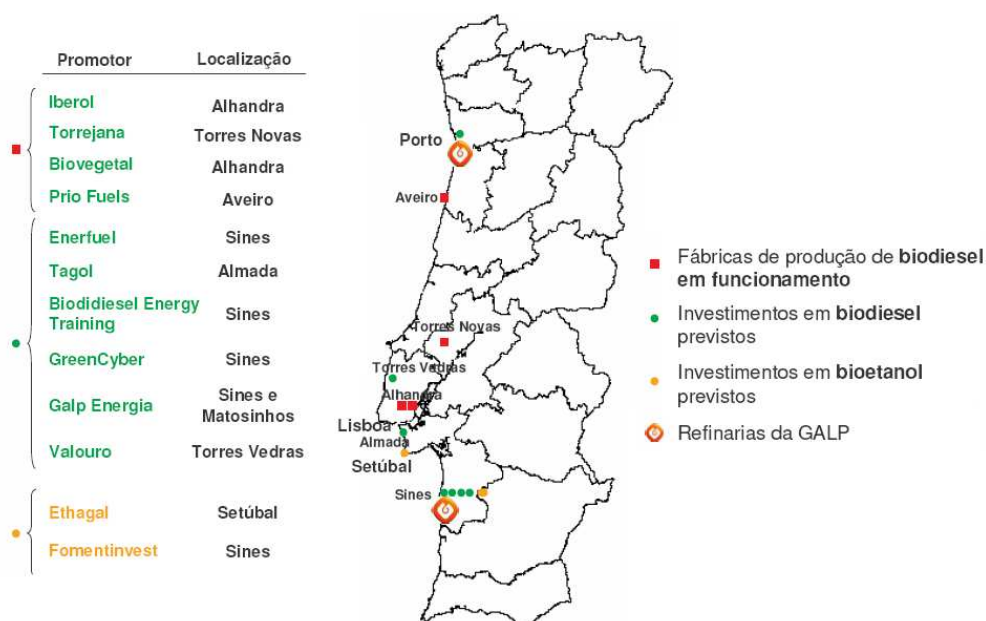


Figura 2.29 - Localização geográfica dos investimentos em Biocombustíveis [34].

2.9 - Síntese/Conclusão

A aposta nas energias renováveis ditada em grande parte quer pelas alterações climáticas registadas quer pela variabilidade que o custo dos combustíveis fósseis, têm vindo a assumir-se no sector da energia eléctrica mundial.

Neste capítulo, foi realizada uma abordagem simplificada relativo à situação actual que as energias renováveis ocupam no sector energético. Salienta-se o facto de ter-se excluído a energia solar pois esta usa uma tecnologia exclusiva para produção de electricidade - painéis fotovoltaicos - fora do âmbito deste trabalho.

Em termos mundiais, a energia eólica tem vindo a destacar-se pelo seu grau de amadurecimento tecnológico, juntamente com a grande hídrica e também a Biomassa. Tal situação tem vindo a verificar-se em Portugal no que diz respeito à energia eólica, mas não tanto no que concerne à Biomassa.

Ainda numa fase pouco expandida, está a energia dos oceanos, e actualmente, poucos aproveitamentos em fase comercial se encontram activos. Diversos protótipos foram já apresentados, estando muitos deles em fase experimental em alto mar.

Em termos ambientais, as energias renováveis constituem uma importante alavanca em termos ambientais e, em particular, no contributo para atingir os objectivos inerentes ao protocolo de Quioto.

Capítulo 3

Os Geradores Eléctricos

Os sistemas de energia eléctrica em corrente alternada funcionam com frequência e tensão constantes. Estas grandezas têm de ser reguladas pelo que os adequados sistemas de monitorização e regulação devem ser aplicados. A regulação da frequência está intimamente relacionada com a manutenção do equilíbrio entre produção e consumo de potência activa. Por outro lado, a tensão é uma grandeza de carácter local, que depende essencialmente dos trânsitos de potência reactiva na rede [36].

Tradicionalmente, a exploração do sistema de energia eléctrico é suportada pelas grandes máquinas síncronas existentes nas centrais térmicas e hídricas. Tal filosofia pode não ser válida para as redes isoladas. A estabilidade do sistema eléctrico de energia está sobretudo limitada ao facto da existência de máquinas síncronas que operam em sincronismo com uma velocidade de rotação rigidamente ligada à frequência da rede [37]. A capacidade de ajuste nos reguladores de carga/velocidade dos grupos geradores (controlo primário) permite a regulação de frequência/potência activa. Do mesmo modo, na regulação de tensão/potência reactiva usam-se os reguladores de tensão dos grupos geradores ou recorrendo à injeção de potência reactiva (condensadores ou compensadores síncronos, entre outros).

A aptidão de controlabilidade que determinados geradores eléctricos apresentam relativamente a outros contribui em muito para a estabilidade do sistema eléctrico. Desta forma, este capítulo é dedicado ao estudo do gerador eléctrico (assíncrono e síncrono) e à sua integração no sistema eléctrico, de forma a garantir a sua robustez.

A variabilidade da carga obriga à necessidade de garantir-se a capacidade do sistema alimentar os consumos de uma forma contínua e com as características de tensão e frequência aceitáveis. Os operadores de sistema têm por objectivo monitorizar o estado do sistema eléctrico, e actualmente, em muitos países, a integração dos novos meios de produção eléctrica com origem nas fontes de energia renovável vêm exigindo a estes, requisitos de controlo.

Na energia eólica, por exemplo, os serviços de sistema obrigaram a exigências de controlo por parte dos parques eólicos. Um deles é aquando a ocorrência de defeitos na rede eléctrica, obrigando estes sistemas a permanecerem conectados à rede durante e após o defeito. Outro importante requisito nos equipamentos eólicos está no controlo de potência activa e reactiva, pelo que esses sistemas terão que estar habilitados no controlo da frequência e tensão da rede eléctrica [38].

3.1 - Gerador assíncrono

As conhecidas características de robustez, simplicidade e baixo custo da máquina assíncrona, têm contribuído em muito para a opção preferencial desta solução ao invés da máquina síncrona convencional ou de ímanes permanentes. Por outro lado, estas duas últimas apresentam a seu favor, argumentos tais como o elevado factor de potência com que operam, o que pode tornar a sua exploração economicamente viável, compensando assim, o investimento inicial, vantagens estas, que apesar de tudo, não conseguem retirar a primazia ao gerador assíncrono [8].

Dependendo do tipo de rotor, estas máquinas classificam-se em: (i) rotor em gaiola de esquilo ou (ii) rotor bobinado (figura 3.1). A existência de anéis colectores e escovas nestas últimas, constitui uma desvantagem para esta configuração, onde as questões relacionadas com o desgaste e consequentes custos de manutenção são maiores. Apesar disso, esta configuração potencia oportunidades que teremos que ponderar e que a fazem a solução actualmente preferida

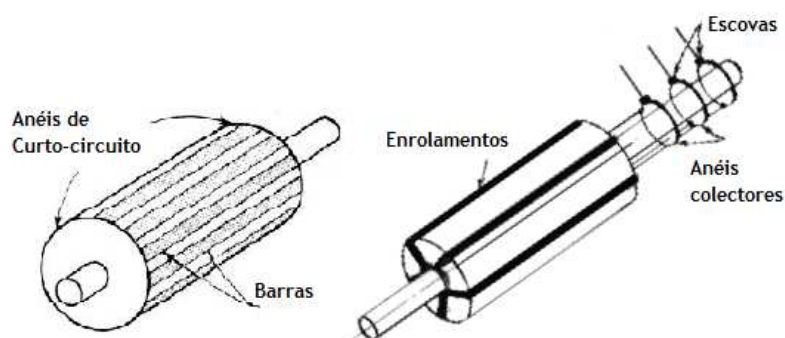


Figura 3.1 - Rotor em gaiola de esquilo (esq.) e bobinado (dir.) [20].

O gerador com rotor em gaiola de esquilo é o mais utilizado em accionamentos de velocidade constante, de facto, a variação da velocidade de rotação da máquina em relação à de sincronismo é muito pequena, por volta de 1-2 %. Esta diferença pode ser explicada pelo deslizamento. As dificuldades de controlo que esta tecnologia apresenta em accionamentos de velocidade variável levaram à adopção de outras soluções técnicas. A introdução da electrónica de potência nestes sistemas conversores foi importante, no sentido de conseguir-se fazer-se a adaptação do sistema à variabilidade da fonte de energia.

A utilização desta tecnologia nas máquinas de indução (com rotor bobinado) duplamente alimentadas veio permitir melhorias no seu controlo. Conseguindo variar a resistência rotórica, é possível variar a velocidade de rotação da máquina de indução; se em lugar de uma resistência variável, se instalar um sistema de conversão CA/CC/CA ligado ao rotor, é possível extrair potência activa pelo rotor da máquina e assim controlar a velocidade. Este é o princípio do aproveitamento da energia de deslizamento nas máquinas de indução de rotor bobinado [7].

3.1.1 - Gerador de indução convencional

A operação da máquina de indução convencional como gerador, caracteriza-se pelo facto de esta girar a velocidades superiores à de sincronismo, a qual depende do número de pólos e da frequência aplicada.

Como gerador, a máquina de indução tem certas limitações, como por exemplo, o facto desta não produzir potência reactiva. Por outro lado, a potência reactiva necessária ao estabelecimento do campo magnético deve ser fornecida, e uma fonte externa de potência reactiva deverá ser conectada de forma a manter o campo magnético da máquina para a sua excitação [8], contrariamente ao que se passa na máquina síncrona que possui um sistema de excitação próprio. O gerador assíncrono é, por conseguinte, um consumidor de energia reactiva, a qual deve ser compensada. A figura 3.2 ilustra a potência reactiva consumida pela máquina de indução em função da potência activa gerada. Nesta configuração, o campo electromagnético, essencial para a conversão de energia mecânica em energia eléctrica, é estabelecido através do estator da máquina. Tal facto implica que a máquina absorve sempre potência reactiva [7]. O factor de potência da máquina aumenta com o aumento da potência activa produzida, sendo esta variação não linear, conforme a figura 3.2.

A escala negativa apresentada representa o consumo de potência reactiva da rede do ponto de vista do gerador.

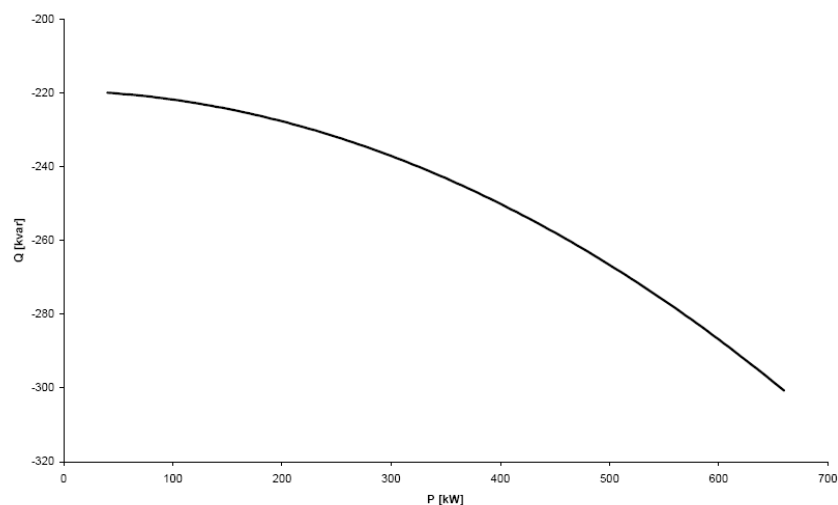


Figura 3.2 - Potência reactiva Q consumida em função da potência activa P produzida [7].

No funcionamento em rede isolada, a adopção pelos bancos de condensadores é a solução mais comum. No caso do paralelo com a rede, a energia reactiva será proveniente desta; no entanto, nestes casos podem também existir bancos de condensadores responsáveis pelo fornecimento parcial ou total desta [8]. A figura 3.3 ilustra um esquema de montagem da máquina de indução.

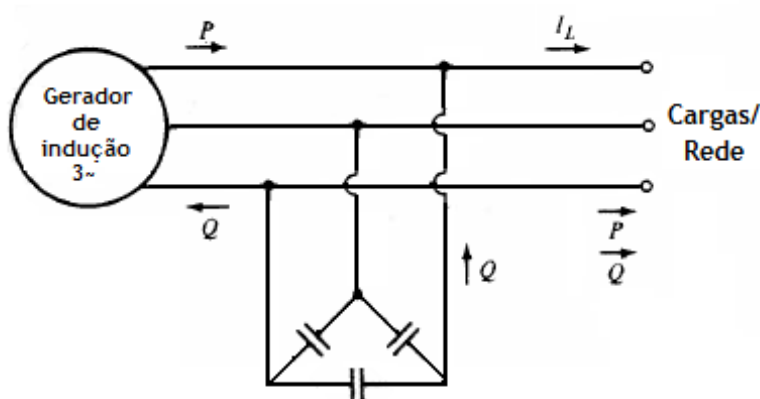


Figura 3.3 - Máquina de indução convencional [39].

Esta fonte externa de potência reactiva deve também controlar a tensão aos terminais do gerador - sem corrente de magnetização, um gerador de indução não consegue controlar a sua tensão de saída. Normalmente, esta é controlada pelo sistema externo ao qual é conectado [39].

O maior problema com o gerador de indução é a variação da tensão que este apresenta em função da variação de carga, e o seu comportamento varia de acordo com a natureza da carga. Tipicamente, a curva que ilustra a tensão terminal de um gerador com um determinado valor de capacidade nos bancos de condensadores é representado na figura 3.4.

Esta situação é detalhadamente analisada em [8] para diversos tipos de carga e valores de frequência.

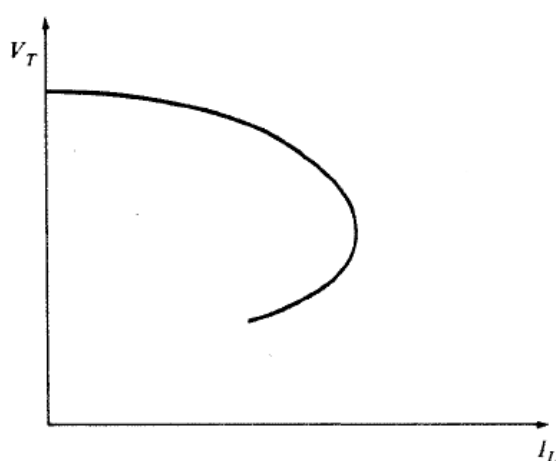


Figura 3.4 - Característica da tensão em função da corrente de carga para um factor de potência constante [39].

A regulação de tensão num valor constante é efectuada pelo controlo da corrente de excitação, proveniente das baterias de condensadores, aumentando ou diminuindo este valor consoante a carga que o gerador alimenta. Em [8], é realizada esta análise para diversos estudos considerados. A dificuldade de controlo da tensão num valor fixo é dificultada pela natureza das baterias de condensadores que são reguladas por escalões.

A variabilidade da carga provoca uma variação da frequência gerada pela máquina, pelo que de acordo com a equação 3.1, demonstrada em [8], a frequência gerada é directamente proporcional à velocidade de rotação do rotor da máquina. Deste modo, obtém-se para o gerador de indução:

$$f_g = \frac{\omega_{rotor}}{\frac{2\pi}{p} \left(1 + \frac{R_r}{R_c} \right)} \quad (3.1)$$

Onde:

- f_g : a frequência gerada pela máquina,
- ω_{rotor} : a velocidade angular do rotor,
- p : número de pares de pólos,
- R_r : a resistência rotórica,
- R_C : resistência de carga

O fluxo de potência reactiva para a máquina reflecte a capacidade de fornecimento de potência activa por parte do gerador de indução, visto que a capacidade nominal do gerador depende da potência aparente, sendo esta função da potência activa e reactiva como evidencia a equação (3.2).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.2)$$

3.1.2 - Gerador de indução duplamente alimentado

Neste tipo de tecnologia, a configuração CA/CC/CA de conversores é conectada entre o rotor da máquina e a rede eléctrica. O conversor ligado à rede opera com a frequência do sistema eléctrico (50 Hz) impondo, deste modo, a frequência de saída do *DFIG* (figura 3.5). O conversor ligado ao rotor opera com diferentes frequências de acordo com a velocidade de operação da máquina. Praticamente, este dispositivo é quem controla o *DFIG*, injectando tensões ou correntes controladas no rotor da máquina eléctrica a partir de estratégias de controlo pré-definidas [40].

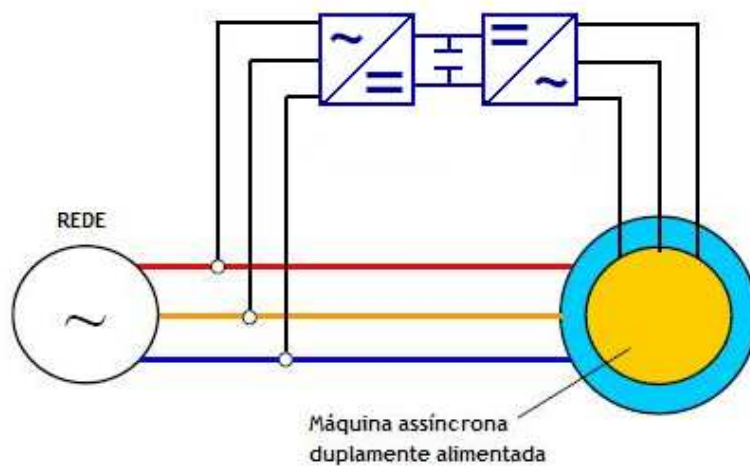


Figura 3.5 - Máquina assíncrona duplamente alimentada [41].

Em contraste com a máquina de indução convencional, a potência eléctrica do *DFIG* é independente da velocidade. Deste modo, é possível explorar a máquina em velocidade variável, adaptando a velocidade do rotor à velocidade da fonte primária e, então, operar a máquina no ponto de operação óptimo para uma determinada velocidade [42].

O *DFIG* tem-se tornado a escolha mais popular em sistemas de conversão de energia eólica. Uma análise ao mercado em [43], para 2007, permite concluir que esta tecnologia lidera com clara vantagem. Especialmente para aplicações superiores a 2 MW, a máquina de indução duplamente alimentada é a tecnologia com maior uso, salienta-se alguns dos mais importantes fabricantes (Vestas, GE Wind Energy, Gamesa, Suzlon).

Destaca-se também a instalação de um protótipo de 40 kW, integrando esta solução no aproveitamento de energia das ondas, na Ilha do Pico, Açores, Portugal.

A introdução de conversores veio permitir uma maior flexibilidade de controlo, permitindo o controlo de tensão num valor constante quando o gerador de indução opera com velocidade variável, bem como permitir o controlo independente de potência activa e reactiva trocada entre a máquina e a rede eléctrica [44].

A maioria das filosofias de controlo adoptado tem por base a modelização do *DFIG* em coordenadas d-q, onde se considera que o vector que representa o fluxo do estator do gerador eléctrico está alinhado juntamente como o eixo de referência “d”. A partir dessa suposição, malhas de controlo relativamente desacopladas podem ser projectadas propiciando ao aerogerador capacidade de fornecer ao sistema potência activa controlada, regulando-se a corrente i_{qr} do rotor, bem como, tensão terminal e potência reactiva ou absorvida, regulando-se a corrente i_{dr} . A regulação de ambas as correntes é realizada, injectando-se tensões ou correntes controladas sobre o rotor do gerador [40].

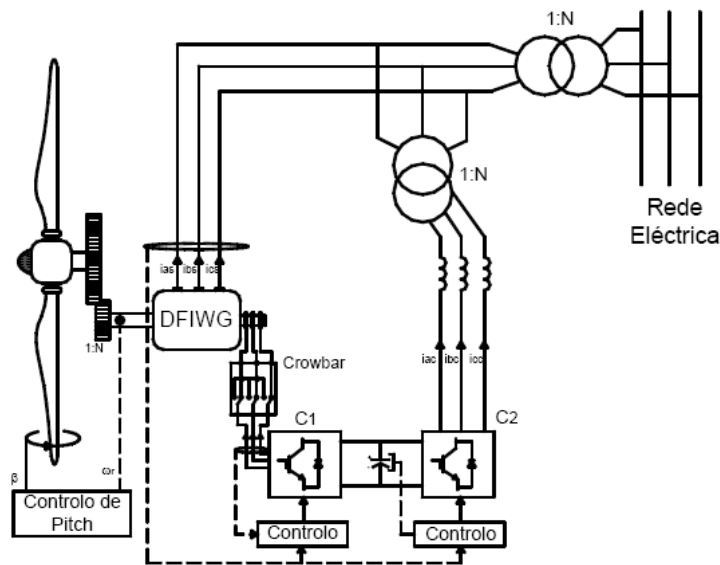


Figura 3.6 - Esquema geral de controlo do DFIG, conversores e controladores [40].

Em condições normais de operação, o conversor do lado do rotor (C1) tem por objectivo controlar a potência activa e reactiva de forma independente. A referência de potência activa gerada é realizada com base nas curvas de potência máxima, que são função das velocidades de vento, garantindo-se deste modo o ponto de operação óptimo. O valor de referência para a potência reactiva, em condições normais, é usualmente fixado num valor zero.

Por outro lado, o conversor do lado da rede eléctrica (C2) tem como objectivo, em condições normais de funcionamento, manter a tensão no barramento CC constante bem como garantir um factor de potência unitário [45].

Para velocidades de vento elevadas, a velocidade da turbina é limitada pela sua capacidade nominal, a qual implica, indirectamente, o valor de potência mecânica extraída.

Esta regulação é feita pelo controlo de velocidade que interage com o mecanismo de regulação das pás - *pitch*.

Os requisitos de sistema, os quais são especificados pelos operadores de sistema, exigem a não saída de serviço por parte dos novos sistemas de conversão eólicos, como por exemplo, a ocorrência de defeitos na rede eléctrica. Tal situação obrigaria à perda de quantidades

significativas de potência eléctrica injectadas. Deste modo, as modernas turbinas eólicas devem tentar operar como as centrais de produção convencionais [45].

A protecção *crowbar* permite garantir a integridade física dos conversores electrónicos. Esta razão é explicada pelos valores elevados de corrente que podem surgir no rotor aquando a ocorrência de defeitos na rede eléctrica. Nestas situações a protecção por *crowbar* curto-circuita o conjunto rectificador/inversor enquanto o defeito persistir. Quando a protecção *crowbar* é “activada”, o conversor do lado do rotor C1 é bloqueado e o *DFIG* comporta-se como um gerador de indução convencional. Este facto implica que toda a controlabilidade do *DFIG* é perdida durante a actuação da protecção *crowbar* [45].

De modo a aproveitar a boa controlabilidade do *DFIG* para apoio à rede eléctrica em caso de defeitos, o conversor do lado do rotor está equipado com um bloco que controla a tensão. Este controlo permite a regulação da tensão no ponto de conexão da turbina eólica ou do parque eólico, ajustando a potência reactiva. O gerador pode, opcionalmente, providenciar potência reactiva indutiva ou capacitiva; isto pode ser aplicado durante desequilíbrios de potência reactiva na rede eléctrica ou quando uma unidade de produção é ligada a esta.

Em contraste com este conversor, o conversor do lado da rede pode permanecer activo durante defeitos à rede e quando a protecção *crowbar* é activada. Este conversor pode ser usado como um STATCOM⁶ e contribuir com injeção de potência reactiva [45].

A participação no controlo primário da frequência por parte dos parques eólicos é estudado em pormenor em [46]. Estes autores apresentam um controlo integrado no bloco de controlo do conversor do lado do rotor. Esta malha de controlo é similar ao que é empregue nos geradores síncronos, ajustando a potência activa produzida de acordo com a variação de frequência. Esta estratégia de controlo obriga a um novo ponto de operação nas curvas de extracção de potência do *DFIG* que não o óptimo, como é habitual fazer-se.

3.2 - Gerador síncrono

A quase totalidade da energia eléctrica é produzida por geradores síncronos ou alternadores trifásicos, que assim constituem os elementos matrizes dos Sistemas de Energia Eléctrica.

Tal como a máquina assíncrona, a máquina síncrona apresenta reversibilidade, podendo funcionar como motor ou gerador. No entanto, é em regime de gerador que o seu uso é mais frequente em instalações eléctricas de corrente alternada. A utilização das máquinas síncronas como gerador tem sido aplicada em diferentes tipos de produção de energia eléctrica, desde as centrais térmicas às centrais hidroeléctricas e mais recentemente no domínio da energia eólica. Elas são também preferidas para centrais de Biomassa e de valorização energética de resíduos urbanos (RSU).

As máquinas síncronas clássicas são utilizadas em sistemas de velocidade ajustável de grande potência. Basicamente, estas constituem os elementos chave de todo o sistema electroprodutor, realizando um controlo contínuo sobre a frequência e tensão do sistema. Este equilíbrio é atingido à custa do ajuste contínuo sobre a potência mecânica fornecidas

⁶ Este tipo de equipamento permite quer controlo do factor de potência quer a regulação de tensão no ponto de conexão, contribuindo para a melhoria da estabilidade dinâmica do sistema eléctrico.

pelas máquinas de accionamento dos geradores síncronos e, assim, a potência eléctrica activa entregue à rede [36]. O sistema de controlo em tempo real de frequência/potência activa é complexo, sendo realizado a nível local pelos reguladores de velocidade dos grupos geradores - controlo primário.

Por outro lado, os geradores síncronos constituem uma importante origem de fornecimento ou absorção de potência reactiva, a nível da rede, à qual estão ligados. Deste modo, cada gerador é dotado de um regulador de tensão, que mantém a tensão no valor de referência, por variação da corrente da excitação da máquina.

Para sistemas de pequena potência, utilizam-se as suas variantes que resultam do uso de ímanes permanentes - máquinas de ímanes permanentes e do efeito de relutância magnética, as máquinas síncronas de relutância [20].

As máquinas síncronas de ímanes permanentes modernas são competitivas com as máquinas síncronas convencionais e com as máquinas de indução; além das vantagens inerentes à sua construção física, a disponibilidade de novos materiais magnéticos com elevados produtos energéticos e de sistemas de controlo baseados em electrónica de potência de custos acessíveis permitem a utilização destas máquinas em aplicações exigentes e com características melhoradas [47].

Esta solução aparece assim como uma alternativa viável em vários domínios, por exemplo em aproveitamentos de energia eólica, quer pela flexibilidade do seu tamanho e forma, quer pelos elevados rendimentos que apresentam. É também elevada a sua robustez e fiabilidade, e baixa a manutenção.

Nas aplicações que requerem potências elevadas, o custo associado a cada unidade é ainda um factor limitativo, mas os desenvolvimentos actuais poderão contribuir decisivamente para um maior aumento da potência disponível a preços menores.

3.2.1 - Gerador síncrono convencional

Nas máquinas síncronas convencionais, os rotores são normalmente de dois tipos: rotores de pólos salientes ou rotores cilíndricos. Nas máquinas de pequena potência usam-se também rotores constituídos por ímanes permanentes.

Nas máquinas equipadas com um elevado número de pólos, isto é, de baixa velocidade de rotação, a opção pelo rotor de pólos salientes é mais comum, sendo caracterizados pelos grandes diâmetros que possuem quando comparado com o seu comprimento. Por outro lado, nas máquinas de rotor cilíndrico, os enrolamentos são montados em ranhuras, criando 2 ou 4 pólos, sendo por isso, máquinas de elevada velocidade. Esta configuração caracteriza-se pelos diâmetros relativamente pequenos e comprimentos bastante superiores. A figura 3.7 ilustra um corte transversal para duas máquinas com aspectos construtivos distintos.

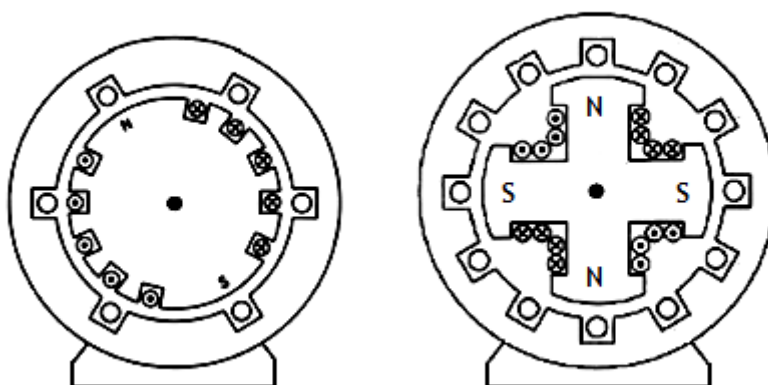


Figura 3.7 - Máquinas síncronas - rotor cilíndrico (esq.) e de pólos salientes [48].

O induzido da máquina síncrona, normalmente no estator, é idêntico ao da máquina assíncrona, e, portanto, constituído por um enrolamento distribuído, normalmente trifásico. O indutor (enrolamento da excitação), normalmente no rotor, é constituído por um enrolamento monofásico alimentado por corrente contínua, formando os pólos da máquina. O enrolamento de excitação está no rotor e é alimentado através de anéis de colectores colocados no veio, sobre os quais deslizam escovas. A excitatriz é, na forma mais básica, um gerador de corrente contínua convencional montado no próprio veio da máquina. Outras soluções integrando rectificadores e com excitatriz em corrente alternada são possíveis, com ou sem escovas.

Nas unidades de menores potências, assiste-se à substituição deste conjunto por ímanes permanentes.

O controlo da excitação da máquina síncrona é realizado pelo controlo da corrente de excitação. O comportamento de um gerador síncrono varia de acordo com a natureza da carga (factor de potência) ou se o gerador funciona de modo isolado ou ligado à rede. Os reguladores de tensão dos quais estão dotados permitem controlar a tensão de saída. Por outro lado, o regulador de velocidade presente no motor primário que move o alternador permite actuar no controlo de admissão do fluido ou vapor (exemplos mais comuns), regulando a velocidade do grupo e, por conseguinte, a frequência [49].

O aumento da carga varia a tensão aos terminais da máquina, sendo esta variação dependente da natureza da carga (ver figura 3.8). No entanto, a regulação da tensão num valor constante aos terminais da máquina implicará necessariamente, variar de forma adequada a corrente de excitação. Ainda na figura 3.8, é ilustrado a variação da corrente de excitação da máquina em função da corrente de carga (para vários f.d.p).

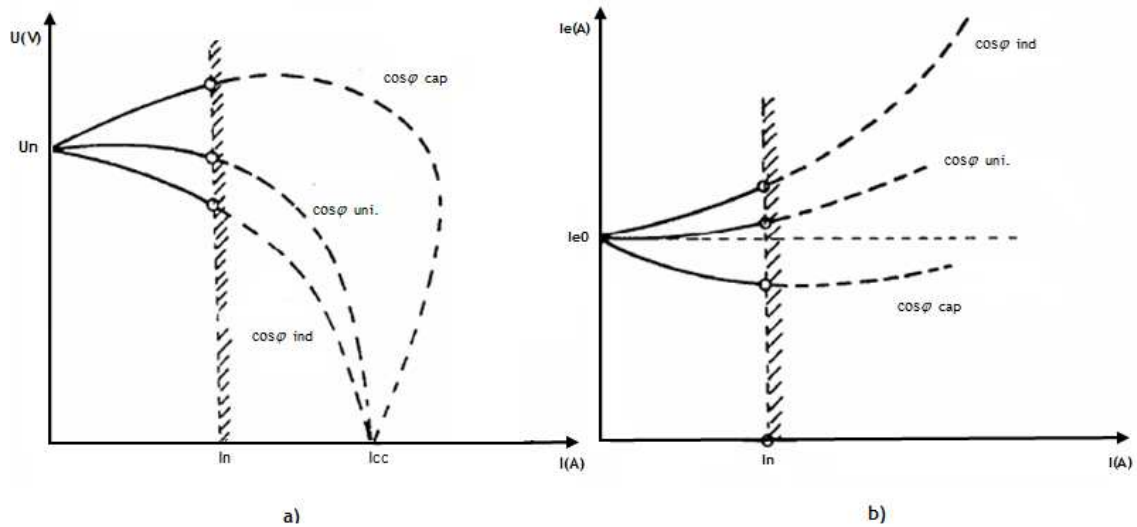


Figura 3.8 - Curvas características de um alternador para distintos tipos de cargas; a) Características externas e b) Características de regulação [49].

3.2.2 - Gerador síncrono de ímanes permanentes

As máquinas síncronas de ímanes permanentes apresentam uma constituição análoga à das máquinas síncronas convencionais constituídas por um estator semelhante ao utilizado nas máquinas convencionais (síncronas ou assíncronas), em que os enrolamentos estão dispostos em ranhuras. Na maioria das configurações rotóricas, os ímanes permanentes são colocados no interior da sua estrutura, podendo também ser aplicados à sua superfície [47].

As máquinas síncronas de ímanes permanentes podem ser classificadas como máquinas síncronas especiais devido à inexistência de corrente de excitação. O campo indutor é criado pelos ímanes inseridos no rotor, o que é equivalente a ter uma máquina síncrona com o rotor excitado por uma corrente constante [20], pelo que não temos controlo sobre o campo indutor. A eliminação dos sistemas indutores clássicos, tais como escovas e anéis, torna-as numa solução com maior fiabilidade e menor manutenção.

A característica principal das máquinas síncronas convencionais é a facilidade de controlo de várias características externas como a tensão nos seus terminais e o factor de potência. Nas máquinas de ímanes permanentes não é possível exercer um controlo nestas características de um modo tão expedito. Devido a esta limitação, as máquinas de ímanes permanentes não têm sido consideradas na conversão de energia nas centrais de grande potência, embora em aplicações de pequena/média potência concorram com os sistemas convencionais, recorrendo a dispositivos de comutação electrónica.

Muitos artigos de pesquisa têm sugerido a aplicação de geradores síncronos de ímanes permanentes em turbinas eólicas devido às suas propriedades de auto-excitação, o que permite uma operação com elevado factor de potência e elevada eficiência [50].

A aplicação da tecnologia de ímanes permanentes é bastante usada em aplicações de pequena escala. No entanto, a sua empregabilidade em maiores escalas tem registado menores avanços, fruto do elevado preço dos ímanes permanentes e custo de fabrico. Além disso, a utilização deste tipo de máquinas requer o uso de conversores electrónicos de

potência com o objectivo de ajustar a tensão e a frequência da produção para os valores destas grandezas da rede eléctrica.

A sensibilidade que os materiais magnéticos apresentam face à temperatura, por exemplo durante a ocorrência de um defeito, pode levar às perdas das qualidades magnéticas do íman. É importante, realizar-se o controlo da temperatura do rotor das máquinas de ímanes permanentes [51].

A vantagem destes sistemas conversores é a possibilidade de produzir energia eléctrica a qualquer velocidade, pelo que este tipo de máquinas poderá assumir um papel relevante na aplicação em sistemas de aproveitamento eólico. Para além disso, a inexistência de caixa de velocidades constitui especial importância no que diz respeito à exploração da máquina o que se traduz numa redução do peso e ruído e num aumento do rendimento e da fiabilidade do sistema [47]. A gama de variação de velocidade de entrada permitida pelo gerador é total, pelo que o sistema de conversão é simplificado, exigindo menor manutenção [20].

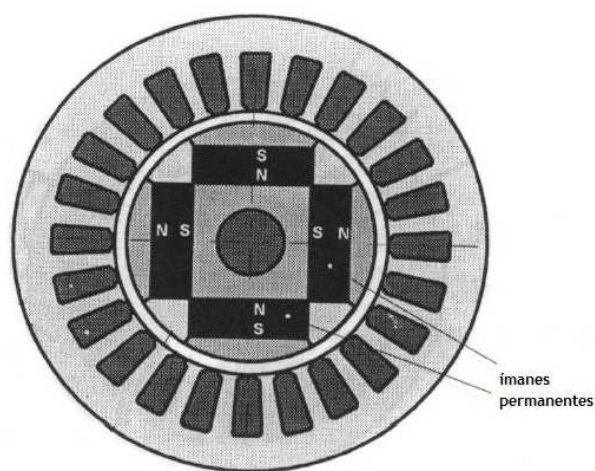


Figura 3.9 - Aspecto construtivo de uma máquina síncrona de ímanes permanentes.

Como gerador isolado, já com centenas de kW, apresenta vantagens relativamente ao gerador de indução, na medida em que se torna menos exigente em termos da correcção do factor de potência. A utilização destas máquinas em aplicações exigentes e com características melhoradas é também devida ao uso de sistemas de controlo baseados em electrónica de potência. Comparativamente às máquinas síncronas convencionais, a maior desvantagem que as máquinas síncronas de ímanes permanentes apresentam reside na falta de controlo de tensão nos seus terminais e factor de potência. O desenvolvimento da electrónica de potência permitiu que, quando associados a estas máquinas, concorram com as máquinas síncronas convencionais, controlando estas características [47].

3.3 - Síntese/Conclusão

Este capítulo foi dedicado ao estudo simplificado dos geradores eléctricos de corrente alternada com maior aplicação na indústria: gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo, gerador de indução duplamente alimentado, gerador síncrono convencional e gerador síncrono de ímanes permanentes.

As dificuldades de controlo de grandezas, tais como a tensão e frequência no gerador de indução com rotor em gaiola tornam-no numa solução desadequada face aos requisitos da rede. No entanto, para aplicações de rede isolada, poderá constituir uma alternativa mais económica e simples. Por outro lado, vimos também a necessidade da instalação de bancos de condensadores, necessários ao seu funcionamento.

A electrónica de potência veio permitir uma melhoria na controlabilidade do gerador assíncrono, e actualmente a sua aplicação no gerador duplamente alimentado na energia eólica tem tido grande empregabilidade. Graças a esta, os aerogeradores têm permitido desempenhar um papel semelhante aos geradores síncronos nos serviços de sistema da rede eléctrica.

Os geradores síncronos têm de facto uma grande capacidade de controlo sobre as variáveis eléctricas constituindo, por isso, os elementos chave no suporte da rede eléctrica, no fornecimento de potência activa e reactiva.

Numa escala mais reduzida, e com menor aplicação, estão os geradores de ímanes permanentes. A dificuldade de controlo sobre a tensão, devido à criação de um campo indutor constante, coloca-a em desvantagem face à máquina síncrona convencional. No entanto, para aplicações de baixa potência, tem-se tornado numa solução preferida.

Capítulo 4

Os Geradores Eléctricos nos Aproveitamentos de Energia Renovável

A natureza intrínseca do recurso natural, bem como as características únicas dos geradores eléctricos, obrigam à escolha acertada do sistema conversor de energia.

Os geradores síncronos convencionais têm sido a escolha preferencial na produção de energia a partir de combustíveis fósseis bem como nos grandes aproveitamentos hidroeléctricos. Estes têm custos efectivos para vários níveis de potência (MW), “trabalham” a rotações constantes e são facilmente controláveis, providenciando potência activa e reactiva em simultâneo.

As características físicas dos novos recursos renováveis são muito diferentes da dos combustíveis fósseis, fruto da sua grande variabilidade. Por exemplo, na energia eólica ou das ondas, um gerador de velocidade fixa “extraíria” uma fracção muito menor de potência disponível que um gerador de velocidade variável [52]. Igualmente, em condições adversas, um gerador de velocidade fixa irá sofrer variações bruscas de carga no seu veio e, no caso da velocidade aumentar, a inércia do sistema absorverá parte da potência mecânica extra.

Isto conduziu à adopção do gerador assíncrono em turbinas eólicas, onde as variações de deslizamento fornecem “medidas” das variações de velocidade. Estas podem ser conseguidas pela variação do número de pares de pólos ou resistência rotórica [53]. Mais recentemente, as melhorias ao nível do custo e performance da electrónica de potência permitiu a adopção de geradores eléctricos de velocidade variável [52].

As soluções actuais para os tipos de geradores eléctricos, actualmente utilizados são: (i) gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo; (ii) gerador assíncrono duplamente alimentado; (iii) gerador síncrono com rotor bobinado; (iv) gerador síncrono de ímanes permanentes.

Veremos neste capítulo as soluções empregues em cada um dos aproveitamentos de energia renovável, fazendo-se uma abordagem do ponto de vista da oferta actual por parte dos construtores. Deste modo, as diferentes configurações de geradores eléctricos que o mercado oferece serão objecto de uma descrição generalizada, avaliando-se as suas características principais.

4.1 - Energia eólica

As exigências em termos de controlabilidade, qualidade e fiabilidade, obrigaram ao desenvolvimento cada vez maior de turbinas eólicas adaptadas aos requisitos do sistema eléctrico de energia.

Uma importante modificação foi a introdução de pás reguláveis, sendo possível controlar a potência “retirada” no vento pelo sistema. Por outro lado, o desenvolvimento dos sistemas eléctricos nos aerogeradores veio revolucionar o campo da exploração eólica. A partir de 1993, alguns fabricantes vieram a substituir o tradicional gerador de indução pelo gerador síncrono, enquanto outros fabricantes iniciaram o uso do gerador de indução duplamente alimentado. Esta evolução resultou do uso da electrónica de potência e conduziu a novos conceitos de controlabilidade dando aparecimento aos geradores de velocidade variável, vindo substituir progressivamente os sistemas de conversão de velocidade constante.

Esta nova filosofia de controlo é importante por inúmeras razões: reduz o stress mecânico sobretudo ao nível da caixa de velocidades (se existente), aumenta a quantidade de energia “capturada” do vento e aumenta a controlabilidade da potência activa e reactiva, as quais vêm sendo cada vez mais importantes para a integração eólica no sistema eléctrico de energia.

Devido ao rápido crescimento da electrónica de potência, que oferece maiores capacidades e baixos custos €/kW, a aplicabilidade desta tecnologia em turbinas eólicas será maior. A electrónica de potência iniciou uma revolução tecnológica no domínio da energia eólica [53].

4.1.1 - Geradores para a Energia eólica

Os primeiros geradores eólicos encontravam-se equipados com máquinas de indução com rotor em gaiola de esquilo (GIGE), ou ditas convencionais. Este tipo de tecnologia fora bastante explorado devido aos seus reduzidos custos operacionais e à sua elevada fiabilidade e robustez. Mais recentemente, estes têm vindo a ser gradualmente substituídos por aerogeradores com melhores capacidades de controlo.

A importância cada vez maior que a produção eólica tem vindo a assumir no sector eléctrico mundial vêm exigindo a estes sistemas de conversão um conjunto de funcionalidades de controlo que não é possível assegurar através de aerogeradores de indução convencionais.

Podem distinguir-se dois tipos de turbinas eólicas, designadas por velocidade variável e velocidade constante. Para estas últimas, é utilizado o gerador de indução convencional, enquanto que o outro tipo, múltiplas soluções são possíveis. As três soluções com maior aplicação em turbinas são: gerador de indução com rotor em gaiola ou duplamente alimentado e o gerador síncrono convencional [54].

A eficiência é um ponto fulcral nas turbinas eólicas. De facto, este requisito é importante na comparação dos diversos tipos de sistemas, uma vez que as perdas reduzem a energia média produzida pelo conversor eólico e, assim, reduz o rendimento. Para além disso, a turbina eólica e a adaptação do gerador deve ser tida em conta. De facto, a escolha do gerador é realizado em função do tamanho da turbina e tipo de vento (figura 4.1) [55].

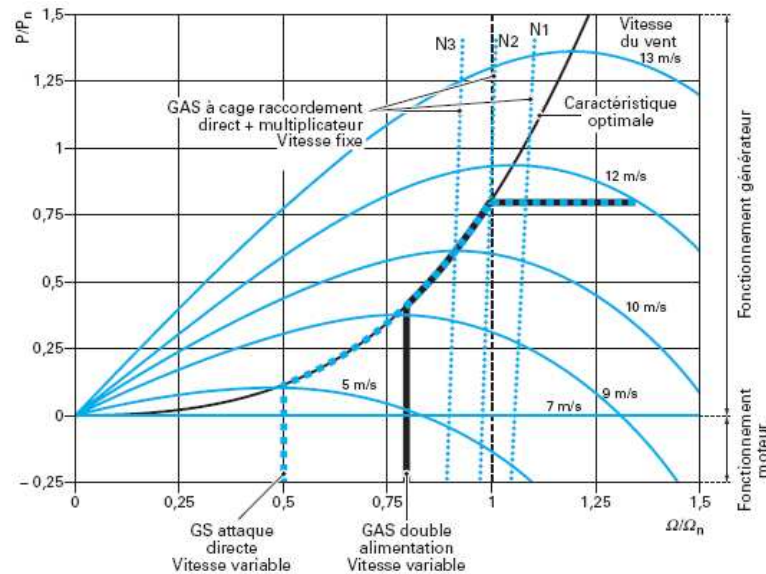


Figura 4.1 - Adaptação da turbina e gerador eólico [56].

Nos sistemas de velocidade fixa, a velocidade da turbina é determinada pela frequência da rede, o número de pares de pólos do gerador, o deslizamento da máquina e a caixa de velocidades. As variações de vento não “afectarão” a velocidade da turbina significativamente, embora tenha efeitos no binário electromagnético e então, na potência eléctrica produzida.

Nos sistemas de velocidade fixa, poderá ser necessário implementar regulação das pás de forma a otimizar a performance do sistema, introduzindo assim o controlo adicional, complexidade e custos [55]. A turbina eólica com maior aplicação está ilustrada na figura 4.2, o gerador de indução “sofre” poucas variações (1-2 %), mantendo uma velocidade fixa. A potência é limitada aerodinamicamente por controlo de *stall*, *active stall* ou *pitch*.

Um sistema de compensação de potência reactiva é necessário de forma a reduzir o consumo desta por parte do gerador de indução [57].

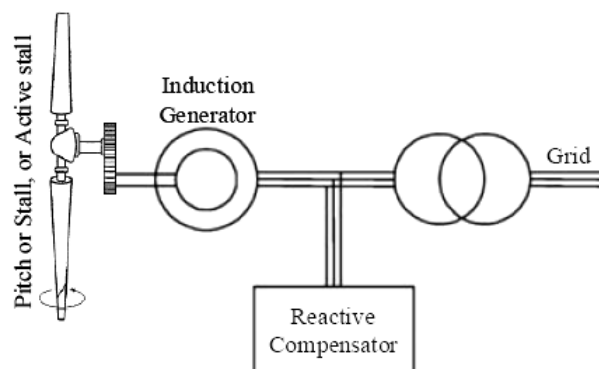


Figura 4.2 - Aerogerador de indução convencional [55].

Esta solução apresenta-se bastante atractiva devido aos baixos custos e elevada fiabilidade, contudo, um sistema de velocidade fixa não extrai tanta energia do vento como um sistema de velocidade variável. Actualmente, estes últimos têm vindo a impôr-se no mercado, devido à possibilidade de monitorizar as variações das velocidades de vento pela adaptação da velocidade do veio do gerador e consequentemente mantendo um nível óptimo de produção.

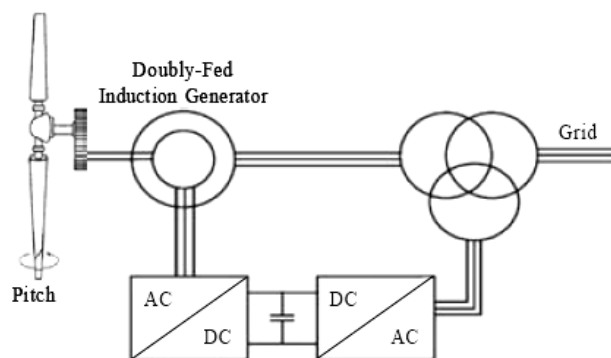


Figura 4.3 - Aerogerador de indução duplamente alimentado [55].

4.1.2 - Geradores de indução

Os aerogeradores de indução convencionais (figura 4.2) são simples e robustos, apresentando um baixo custo de investimento e oferecendo uma reduzida controlabilidade. O significativo aumento consumo de potência reactiva, sobretudo em períodos que se seguem à ocorrência de defeitos por parte dos geradores de indução constitui uma das grandes barreiras à utilização desta tecnologia. Neste sentido, a capacidade do sistema eléctrico em suprir energia reactiva “exigida” pelos parques eólicos dotados destes equipamentos, mantendo os níveis de tensão admissíveis constituiu uma alavanca ao desenvolvimento e adopção de tecnologias com níveis de controlo mais sofisticados capazes de entregarem à rede eléctrica potência activa e reactiva controladas, beneficiando a estabilidade e o comportamento dinâmico do sistema [40].

Neste cenário, a preferência pelo gerador de indução duplamente alimentado (figura 4.3) ou os síncronos têm recebido particular interesse neste domínio. A versatilidade de controlo que estas apresentam foi em grande parte devida à utilização dos dispositivos de electrónica de potência que utilizam, como já foi amplamente referido.

A principal razão para a popularidade do gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) deve-se ao facto de este operar com velocidade variável, recorrendo a conversores electrónicos com capacidades nominais bastante reduzidas - cerca de 10-25 % da capacidade nominal do conjunto turbina/gerador, apresentando-se como uma solução eficiente do ponto de vista económico para aerogeradores de velocidade variável [53].

Apesar da melhor relação custo benefício relativamente a um gerador síncrono, o *DFIG* utiliza caixa de velocidades acarretando custos adicionais [40].

Outras funcionalidades, tais como, a controlabilidade da potência reactiva “ajudam” o *DFIG* a desempenhar um papel similar que os geradores síncronos [55].

4.1.3 - Geradores síncronos

Os geradores síncronos têm a particularidade de dispensarem a caixa de velocidades, embora como um significativo aumento do tamanho (diâmetro do gerador) para acomodar o elevado número de pólos exigido. Esta natureza construtiva acarreta as mesmas velocidades de rotação tanto da turbina como do rotor, tipicamente 10 a 25 rpm para turbinas eólicas de alguns MW, pelo que obriga a um elevado número de pares de pólos [54]. Os geradores síncronos apresentam custos superiores quando comparados com os de indução, para a mesma potência [55].

Os geradores síncronos de ímanes permanentes (GSIP) são actualmente uma solução apreciada em soluções de micro-eólica (ME), embora ainda não se tenham difundido para aplicações em maior escala, em grande parte devido à utilização de grandes e pesados ímanes permanentes. Apesar disso, turbinas eólicas equipadas com esta tecnologia estão sendo alvo de ensaios experimentais (ver secção 4.1.4).

A propriedade de auto-excitação do *GSIP* tem merecido um especial destaque, permitindo uma operação com alto factor de potência e elevada eficiência. Por outro lado, a dispensa de caixa de velocidade tal como a máquina síncrona convencional confere-lhe também inúmeras vantagens. Esta aplicação apresenta uma configuração semelhante à de uma máquina síncrona convencional, com as vantagens da ausência do sistema indutor clássico, constituído por anéis e escovas, tornando-as mais fiáveis, de maior eficiência e custos menores. Do ponto de vista estrutural, estas são caracterizadas por uma simplicidade similar às máquinas de indução [47]. A adaptação de ímanes permanentes permite também alojar maior número de pólos no mesmo perímetro, ou seja, para o mesmo número de pólos, a máquina de ímanes permanentes possui menor diâmetro que a síncrona convencional.

Na tabela 4.1 é apresentado um estudo comparativo para os 3 tipos de tecnologia com maior aplicação actual, expondo-se os pontos positivos (+) e negativos (-) de cada uma.

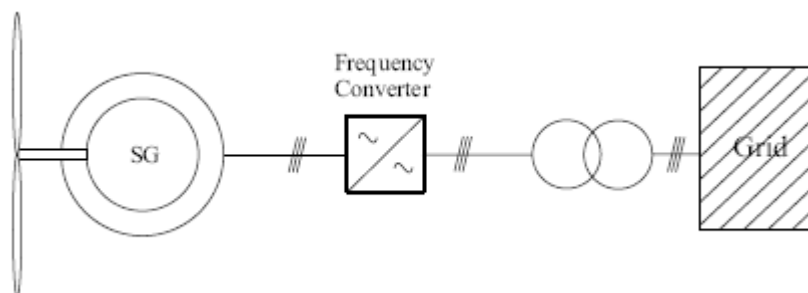


Figura 4.4 - Aerogerador síncrono com acoplamento directo [58].

Tabela 4.1 - Comparação entre tecnologia eólica [54].

		<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	Variação 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	-	+	+

4.1.4 - Mercado actual

O potencial avaliado para a energia eólica é enorme e o desenvolvimento de turbinas eólicas cada vez maiores é bem notório. Actualmente, a *Enercon* dispõe da maior turbina eólica alguma vez construída até à data, a E-126 de 6 MW.

Destaque ainda para os investimentos em I&D realizados pela empresa *Siemens* para o sector. A empresa está actualmente a testar duas turbinas eólicas de 3,6 MW equipadas com geradores síncronos de ímanes permanentes. Esta iniciativa terá como finalidade obter conclusões sobre a utilização deste tipo de tecnologia face às oferecidas pela maioria dos fabricantes.

Para além destes tipos de tecnologias mais comumente utilizados, a evolução da electrónica de potência veio manifestar um interesse noutros tipos de geradores. Destacam-se entre eles, o gerador de relutância (tipo particular de gerador síncrono), o gerador de fluxo transversal bem como nas máquinas multi-pólos [53].

A tabela 4.2 apresenta alguns dos fabricantes de turbinas eólicas a nível mundial, especificando-se o tipo de controlo adoptado bem como as potências comercializadas.

Tabela 4.2 - Tecnologia eólica: alguns fabricantes actuais [55].

Fabricante	Conceito ⁷	Gama de Potência
BONUS (Dinamarca)	CT/CS	600 kW
	CT/AS	1- 2,3 MW
DEWIND (Reino Unido/Alemanha)	VDTI	600 kW - 2 MW
ECOTECNICA (Espanha)	CT/CS	750 - 1300 kW
	VTDI	1670 kW
ENERCON (Alemanha)	VTDD	300 kW - 4,5 MW
GAMESA (Espanha)	VTDI	850 kW - 2 MW
GE WIND ENERGY (EUA/Alemanha)	CT/CS	600 kW
	VTDI	900 kW - 3,6 MW
JEUMONT (França)	VTDD	750 kW - 1,5 MW
MADE (Espanha)	CT/CS	600 kW - 1,3 MW
	VTSGP	2 MW
NEG MICON (Dinamarca)	CT/CS	600 kW - 1,5 MW
	CT/AS	1,5 - 2 MW
	VTDI	2,75 - 4,2 MW
NORDEX (Alemanha)	CT/CS	600 kW - 1,3 MW
	VTDI	1,5 - 2,5 MW
REPOWER SYSTEMS (Alemanha)	CT/CS	600 - 750 kW
	CT/AGP	1050 kW
	VTDI	1,5 - 2 MW
SUZLON (Índia)	CT/AGP	950 kW - 2,1 MW
VESTAS (Dinamarca)	SVT/OSP	660 kW - 2,75 MW
	VTDI	850 kW - 3 MW

4.1.5 - Micro-eólica

A figura 4.5 presente em [51] apresenta as percentagens do tipo de geradores aplicados em sistemas de micro-eólica (ME). A análise feita por [51], permitiu destacar os dois tipos de geradores com maior aplicação em micro-aerogeradores: geradores assíncronos e geradores síncronos de ímanes permanentes.

⁷ CT/CS: velocidade fixa, *stall* clássico; CT/AS: velocidade fixa, *stall* activo; CT/AGP: velocidade variável, *pitch* combinado com gerador assíncrono; VTDI: velocidade variável, *pitch* DFIG; VTDD: velocidade variável, gerador síncrono convencional; VTSGP: velocidade variável, *pitch* combinado com gerador síncrono convencional; SVT/OSP: velocidade semi-variável, *pitch* combinado com *OptiSlip*

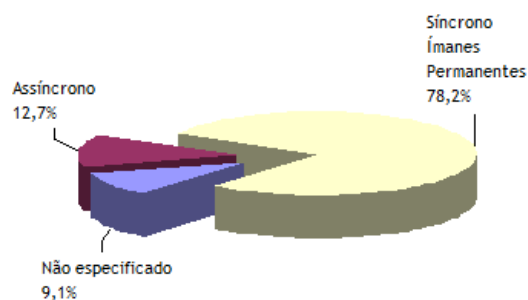


Figura 4.5 - Percentagem de geradores utilizados em sistemas ME [51].

4.2 - Energia das Ondas

No domínio da energia eólica, as soluções em termos de geradores eólicos têm convergido para um número reduzido de soluções, por razões económicas e técnicas. O índice de penetração da energia eólica rapidamente cresceu na última década e o amadurecimento tecnológico alcançado até ao momento permitiu atingir um estado em que as configurações em termos de sistemas eléctricos estão convergindo para um leque restrito de opções [52].

A energia das ondas tem historicamente tentado emergir com uma implementação comercial, no entanto, nos últimos anos tem-se assistido ao amadurecimento de algumas tecnologias, com várias empresas no sector a realizarem ensaios em alto-mar com protótipos e actualmente desenvolvendo-os à escala real. A energia das ondas é actualmente um recurso pouco explorado, embora tenha potencial para contribuir para o mix energético mundial. A fim de utilizar geradores eléctricos convencionais, interfaces mecânicos são utilizados, bem como sistemas hidráulicos e turbinas de ar.

Para sistemas *Offshore*, a dificuldade de acesso ao equipamento é um factor limitativo, pelo que a manutenção do próprio sistema deve ser a menor possível. Este factor é decisivo na escolha do equipamento, pelo que, normalmente, máquinas que solicitem escovas no seu aspecto construtivo não serão apropriadas [59]. Todos os componentes deverão ter a capacidade de “sobreviver” à maior parte dos estados do mar, o dimensionamento do próprio dispositivo não é fácil, e é provável que este fique sobredimensionado [59]. As diversas formas de captação do recurso natural poderão levar a diferentes conceitos de aproveitamentos, exigindo por isso, tecnologias distintas (figura 4.6) ainda em fase de experimentação e investigação, incluindo o tipo de gerador que melhor se adaptará às exigências da aplicação.

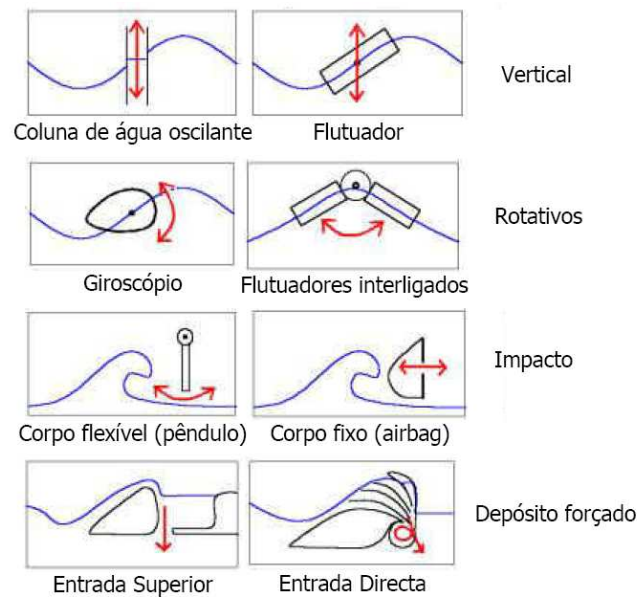


Figura 4.6 - WavePlane production [20].

4.2.1 - Conversão da Energia das Ondas

Os sistemas de aproveitamentos primários “capturam” a energia mecânica, transformando-a em energia eléctrica. Quer em sistemas de conversão da energia das marés, quer de energia das ondas, uma interface mecânica pode ser empregue com a finalidade de converter os lentos movimentos rotacionais ou aleatórios em movimentos rotacionais rápidos para conexão a um gerador eléctrico convencional. A ligação directa é também uma opção mas a sua utilização em dispositivos deste género não é habitual.

As formas primárias de captação de energia das ondas, presentes nos conversores podem ser classificados em [52]:

- **Turbo-geradores rotativos** - tipicamente accionados por um fluxo de ar oscilante;
- **Motores-geradores hidráulicos** - tipicamente accionados por um fluido pressurizado;
- **Geradores lineares directos** - tipicamente accionados pelos movimentos ondulatórios do mar.

Outro autor em [59] também considera um outro tipo de conceito, muito idêntico aos sistemas hidráulicos, com a diferença de que o fluido utilizado é a água - *Water Turbines*.

Enquanto que os geradores lineares parecem estar longe da comercialização, os dispositivos hidráulicos e de fluxo de ar atingiram o estado pré-comercial. Os conversores OWC (*Oscillating Wave Columns*) são os dispositivos com maior avanço actual, o principal motivo para o seu estado de desenvolvimento é o facto de se poderem utilizar geradores rotativos standard nestes dispositivos. As máquinas de indução bem como as de ímanes permanentes foram consideradas para estes dispositivos [54]. Contudo, não há um definitivo consenso para o mais apropriado gerador a aplicar.

4.2.1.1 - *Oscillating Water Columns (OWC)*

Neste tipo de aproveitamento, o fluxo de ar bidireccional que circula, resultante da ondulação presente, é convertido em movimento rotacional unidireccional; utiliza uma turbina *Wells*, a qual funciona a velocidade variável, tipicamente entre as centenas e milhares de rpm.

A máquina de indução parece ser a solução preferencial para este tipo de aplicação - os protótipos existentes são: LIMPET, PICO OWC e Energetech na Austrália [59].

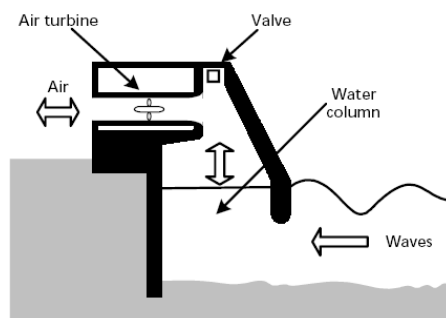


Figura 4.7 - *Oscillating Wave Columns (OWC)* [21].

4.2.1.2 - *Hydraulic Systems*

O movimento alternado num dispositivo pode ser aproveitado para bombear um fluido. A figura 4.8 mostra um esquema básico de um dispositivo flutuante, conduzindo um sistema hidráulico baseado na circulação de óleo, utilizado para deslocamentos axiais, e que bombeia um fluido que acciona um motor hidráulico, o qual é acoplado a um gerador eléctrico de indução convencional.

Por outro lado, os acumuladores existentes providenciam energia armazenada de forma a compensar as variações do recurso existente [59]. Os sistemas hidráulicos tendem a ser propostos para os dispositivos flutuantes, tirando-se partido da sua elevada densidade de energia de forma a acomodar a restrições de peso e dimensões. Contudo, os sistemas hidráulicos de deslocamento axial requerem baixas velocidades de operação [59].

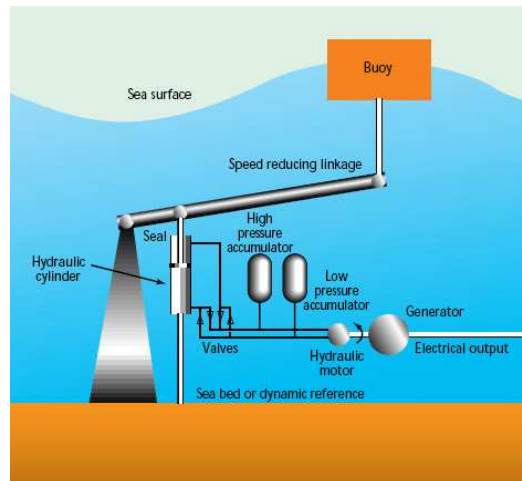


Figura 4.8 - Esquema de um sistema hidráulico [60].

4.2.1.3 - Water turbines

Estes tipos de turbinas podem ser utilizados em sistemas hidráulicos de bombagem onde o fluido é a água; mais recentemente, este conceito tem sido proposto para os dispositivos do tipo *overtopping* (figura 4.9), que são essencialmente sistemas de baixa queda. O princípio de funcionamento baseia-se no galgamento das ondas, onde a água é acumulada num reservatório, a qual acciona uma turbina acoplada a um gerador rotativo convencional [59]. O *Wavedragon* é o exemplo mais conhecido deste tipo de dispositivo, podendo ser comparado a uma mini-hídrica flutuante, pois o seu princípio de funcionamento é em tudo semelhante a um aproveitamento hídrico convencional [21].

As turbinas giram a velocidades variáveis e baixas, pelo que a forma mais eficiente de produzir é utilizando geradores de ímanes permanentes. Desta forma, é dispensada a caixa de velocidades, reduzindo-se quer as perdas quer os custos associados à sua manutenção [61]. Estes geradores “trabalham” a altas frequências, reduzindo-se o tamanho do equipamento e peso.

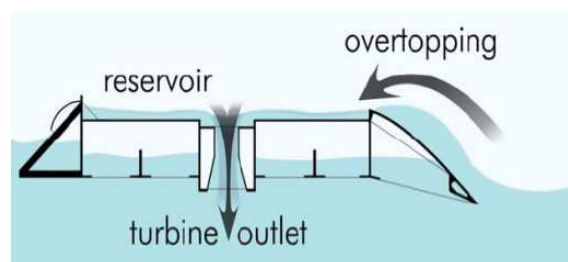


Figura 4.9 - Overtopping device [21].

4.2.1.4 - *Direct drive* (acoplamento directo)

Neste tipo de sistema, não existe nenhuma interface mecânica acoplada ao gerador eléctrico. Deste modo, torna-se vantajoso pela sua simplicidade, requerendo menores partes móveis, menor manutenção e maiores eficiências. As máquinas de acoplamento directo são fisicamente maiores e pesadas, este conceito foi demonstrado no *Archimedes Wave Swing* (AWS), tendo-se utilizado um gerador linear de ímanes permanentes [59].

O *Archimedes Wave Swing* (AWS) foi o primeiro dispositivo de conversão a adoptar o sistema de ligação directo, isto é, interligação directa ao gerador eléctrico (figura 4.10). O movimento linear característico deste dispositivo pode ser extraído e convertido em energia eléctrica, em princípio, este pode ser feito pela conversão do movimento linear em movimentos rotativos e usando um gerador rotativo [54].

O protótipo submerso em Setembro de 2004 é dotado de um gerador linear de ímanes permanentes. Em [54] são apresentadas algumas considerações sobre este sistema de conversão, enumerando as suas desvantagens. Por outro lado, este autor conclui que o gerador de ímanes permanentes parece ser a melhor a solução para o AWS, fruto da sua elevada eficiência e menores custos relativamente às soluções de geradores convencionais.

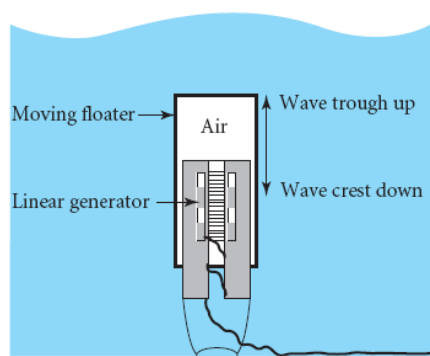


Figura 4.10 - *Archimedes Wave Swing* (AWS) [21].

O acoplamento directo vem sendo utilizado actualmente nas turbinas eólicas, como alternativa à caixa de velocidades, por questões de fiabilidade. Igualmente, no sector da energia dos oceanos, este conceito é igualmente atractivo em termos de eficiência, fiabilidade e robustez. A eficiência calculada no gerador linear utilizada no AWS, “suporta” parte destes argumentos, no entanto, a pouca experiência até agora registada não permite tirar conclusões em termos de fiabilidade [59].

Os conversores de energia das ondas não se prestam à aplicação directa dos geradores eléctricos rotativos convencionais. A necessidade do uso de um acoplamento mecânico para que um gerador de indução possa ser implementado, traduz-se em maiores perdas, afectando a eficiência global do sistema. Estas perdas adicionais, podem ser “eliminadas”, recorrendo à solução de acoplamento directo. Contudo, existem inúmeros desafios de engenharia que devem ser ultrapassados na integração directa nestes tipos de conversores, os maiores dos quais são o tamanho e o peso [59].

A melhor solução irá depender muito da topologia adoptada para o dispositivo e, por isso, comparações entre os diversos tipos de máquinas precisam de ter em conta a integração estrutural do gerador no próprio dispositivo. Exemplo disso é o Pelamis, onde o espaço físico é uma restrição, pode entretanto não beneficiar do acoplamento directo que é caracterizada pelas maiores dimensões e peso, como já foi anteriormente referido.

Em [20], e já em fase da sua conclusão, é apontado como maior adequação ao recurso a máquina síncrona de ímanes permanentes em relação às máquinas standard. As razões enunciadas por [20] são:

- Sistema de acoplamento directo, dispensando a caixa de velocidades, facilitando a manutenção e espaço;
- Capacidade de resposta a baixa velocidades. Não depende da ligação à rede, uma vez que a sua excitação é permanente;
- Inexistência de anéis e escovas, implicando menor manutenção;
- Dimensões e peso, igual ou inferior, às máquinas assíncronas convencionais

A tabela 4.3 sumariza, para os dispositivos com maior avanço actual, as opções tecnológicas adoptadas [59].

Tabela 4.3 - Soluções tecnológicas utilizadas em sistemas de conversão de energia das ondas [59].

<i>Device</i>	<i>PTO⁸</i>	<i>Generator</i>	<i>Speed</i>
<i>LIMPET</i>	<i>OWC & Wells Turbine</i>	<i>Induction</i>	<i>Variable</i>
<i>PELAMIS</i>	<i>Hydraulics</i>	<i>Induction</i>	<i>Fixed</i>
<i>AWS</i>	<i>Direct Drive</i>	<i>Linear PM</i>	<i>Variable</i>
<i>WAVEDRAGON</i>	<i>Water-turbine</i>	<i>Rotary PM</i>	<i>Variable</i>
<i>PICO</i>	<i>OWC & Variable Pitch Turbine</i>	<i>DFIG</i>	<i>Variable</i>
<i>ENERGETECH</i>	<i>OWC & Variable Pitch Turbine</i>	<i>Induction</i>	<i>Variable</i>

⁸ *Power take-off*

4.3 - Energia das marés

O potencial energético das marés é enorme. As propriedades do fluido - a água - bem como a previsibilidade deste recurso tornam-o particularmente atractivo e com maiores vantagens, quando comparado com outras fontes de energia renovável [62].

Para além disso, as preocupações com as alterações climáticas desencadearam o ressurgimento do interesse nesta tecnologia, estando em fase experimental diversos protótipos.

Basicamente, existem duas formas de aproveitamento da energia das marés: com o recurso à construção de barragem, em estuário ou baías, ou extraíndo a energia cinética resultante da movimentação das águas. A primeira forma de aproveitamento (barragem), aplica os mesmos princípios de funcionamento que uma central hídrica, à excepção, das marés que fluem em ambos os sentidos, estando o geradores eléctricos concebidos para responder a ambas as direcções (figura 4.11).

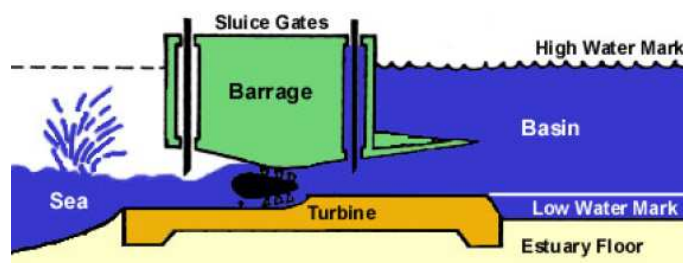


Figura 4.11 - Tidal barrage com turbina do tipo Bulbo [63].

A intermitência característica de muitas das fontes de origem renovável é uma desvantagem que na energia das marés é descartada. De facto, as marés são um recurso bastante previsível, sendo esta previsibilidade fundamental para o êxito na integração das fontes renováveis na rede eléctrica [62]. Por outro lado, a água é mais de 800 vezes mais densa que o ar, logo, a energia contida neste recurso é muito superior que a do vento, com características de velocidades idênticas. Em média, a densidade energética das marés é 4 vezes superior que a do vento, isto significa, que o rotor pode apresentar dimensões menores (logo, mais barato) que uma típica turbina eólica.

4.3.1 - Geradores eléctricos: topologias

A maioria da tecnologia que tem sido sugerida para aplicações ao nível da energia das marés é remanescente da utilizada em aproveitamentos eólicos. Parece óbvio que algumas topologias de geradores adoptadas em geradores eólicos poderiam ver a sua aplicação neste tipo de aproveitamentos.

Além disso, deve-se distinguir duas categorias de topologias existentes: o acoplamento directo e o indirecto. Para estas aplicações, a manutenção é ponto essencial e por vezes é considerado como uma barreira ao desenvolvimento das turbinas para as marés. A caixa de velocidades poderá ser uma solução a dispensar, dada à sua necessidade de lubrificação constante e perdas adicionais. Neste contexto, o acoplamento directo é uma

solução alternativa. Para além das similaridades com a energia eólica, a energia das marés apresenta características distintas tais como, o reduzido diâmetro das pás (figura 4.12) e as dificuldades de manutenção. Em comparação com as turbinas eólicas actualmente empregues, a energia produzida bem como o tamanho de uma turbina para aplicações em marés parece ser bastante promissor [62]. A figura 4.12 compara para a mesma potência nominal, as dimensões em termos de turbinas para as duas aplicações consideradas.



Figura 4.12 - Comparação entre turbinas eólica e marés [62].

Estas características irão “promover” algumas topologias que não têm a sua aplicação frequente em turbinas eólicas. As turbinas de eixo vertical com um gerador síncrono são uma destas aplicações. Uma vantagem é o facto de o gerador poder estar instalado acima ou abaixo da turbina, significando que o tamanho do gerador não é constrangido pela turbina.

Outra aplicação (*rim tidal turbine*) pode ser utilizada na extracção de energia, esta topologia, apenas apresenta uma parte móvel. Este tipo de turbina, integra um gerador de ímanes permanentes, minimizando os requisitos de manutenção. Este conceito foi adoptado pela *OpenHydro* (figura 4.12).

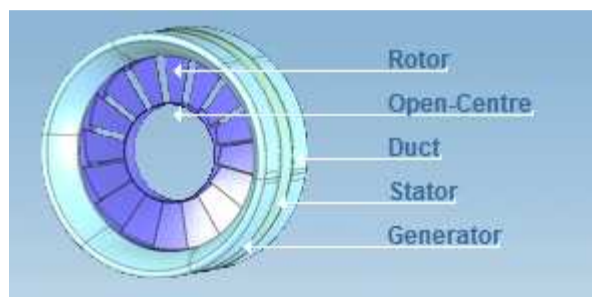


Figura 4.13 - *Open-Centre turbine* (Fonte: www.openhydro.com).

4.4 - Energia hídrica

Hoje em dia, falar da energia hídrica, é maioritariamente referir-mo-nos à grande hídrica, devido à potência instalada, comparativamente à sua congénere - a mini-hídrica.

Nas centrais de potência elevada, onde são exigidas soluções técnicas mais elaboradas, os aspectos económicos são menos críticos, pelo que o gerador síncrono é normalmente o conversor eleito [64].

Nos pequenos aproveitamentos hídricos, a pequena utilização do alternador síncrono deve-se mais a problemas de investimento inicial face à potência instalada, do que às características de funcionamento e de exploração do aproveitamento [65].

A opção do gerador síncrono nos aproveitamentos hidroeléctricos deve-se essencialmente a situações em que [65]:

- a potência do gerador é elevada (>5MVA);
- é necessário fornecer energia reactiva à instalação em que o gerador está interligado (correção do factor de potência);
- quando é necessário um funcionamento com carga variável mas com tensão constante (regulação de tensão);
- e quando é possível realizar-se um investimento maior

Por outro lado, a natureza dos caudais e quedas envolvidas nestes dois tipos de empreendimentos, determina também a opção pelo conversor mecano-eléctrico. Para pequenas máquinas, em termos de manutenção, tamanho e preço, o gerador de indução é mais vantajoso do que o alternador.

Enquanto no alternador as condições de queda de água exigem um mínimo de momento de inércia para assegurar o controlo de estabilidade da velocidade, no gerador de indução não, podendo este ser projectado com tamanhos inferiores aos dos alternadores. De tudo isto, e em termos práticos, parece que para pequenos aproveitamentos hidroeléctricos o gerador de indução é muito competitivo e deixa-o de ser para médias e inviável para potências consideráveis [66].

Em Portugal, verifica-se que a maior parte das centrais mini-hídricas está equipada com geradores síncronos, contrariando a regra exposta acima. Tal acontecimento, deve-se ao facto da pouca experiência adquirida até à altura com as máquinas assíncronas. Por outro lado, e uma vez que, para quedas baixas, a velocidade da turbina é baixa, poucos fabricantes de máquinas de indução ofereciam soluções equipadas com vários pólos para estas aplicações [65].

4.4.1 - Centrais mini-hídricas

Contrariamente aos grandes aproveitamentos hidroeléctricos que produzem energia de algumas centenas de MW, o desenvolvimento de mini-hídricas não está associado a investimentos avultados como as anteriores. Para além disso, estas são ambientalmente menos perigosas, não exigindo a construção de reservatórios, o que obrigaria à eventual reinstalação de populações e perda de terras produtivas [67]. Em regra, as mini-hídricas são centrais de fio de água, não sendo possível grande regularização do caudal afluente como ocorre nas centrais de albufeira.

As mini-hídricas não são uma cópia reduzida das grandes centrais hídricas, têm características próprias, algumas das quais [68]:

- Obra civil orientada para sistemas compactos e simples, para reduzir trabalhos no local;
- Turbinas normalizadas com bons rendimentos para uma larga gama de regime de funcionamento;
- Maior simplicidade de operação incluindo a automatização total da central;
- Utilização de máquinas assíncronas como geradores

A figura 4.14 ilustra um esquema típico de uma mini hídrica.

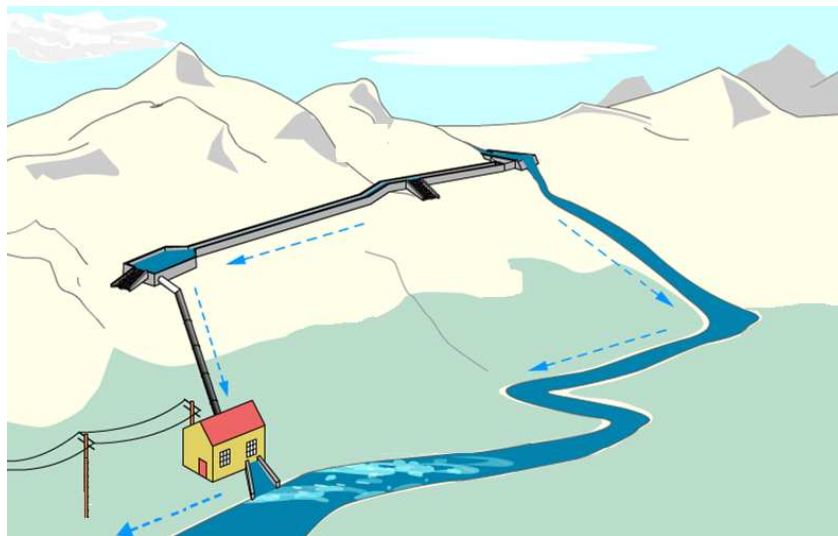


Figura 4.14 - Esquema típico de uma central mini-hídrica [68].

Em regra, os geradores assíncronos são os utilizados em aproveitamentos hídricos de baixa potência (as razões para esta escolha tem essencialmente um aspecto económico). As máquinas de indução são projectadas para operação contínua, requerem menor manutenção do que os geradores síncronos, são robustos e para potências inferiores são menos dispendiosos e mais facilmente disponíveis [67].

4.5 - Energia da Biomassa

As aplicações térmicas com produção de calor e água quente sanitária são as formas mais comuns do aproveitamento da Biomassa. Num nível inferior, situa-se a produção de energia eléctrica. Os consumos térmicos de determinadas indústrias são muitas vezes abastecidos por caldeiras a Biomassa. Trata-se essencialmente do aproveitamento dos resíduos agro-florestais para produção de calor que, em ocasiões, é acompanhado de produção eléctrica - a cogeração [69].

Os sistemas de cogeração classificam-se de acordo com o tipo de máquina térmica que os equipam. Como máquinas térmicas são usados, tradicionalmente, motores alternativos (de explosão - ciclo Otto ou de compressão interna - ciclo Diesel) ou turbinas (a gás ou a vapor) e, mais recentemente, e numa escala mais reduzida, as microturbinas [70].

A combustão directa é talvez o método mais simples de extracção de energia a partir da Biomassa. A diversidade da matéria-prima, tal como, madeira, resíduos agrícolas ou sólidos urbanos, entre outros, podem ser utilizados. Deste modo, a Biomassa é queimada, produzindo vapor, vapor este que acciona uma turbina acoplada a um gerador, produzindo electricidade [71].

A produção de electricidade necessita de sistemas mais complexos dado o baixo poder calorífico da Biomassa, a sua elevada percentagem de humidade e conteúdo em elementos voláteis. Para esta, são necessários grandes centrais térmicas, no entanto, o pouco peso que esta tecnologia assume relativamente às térmicas convencionais está bem presente [69]. Este facto é em grande parte devido às dificuldades de aprovisionamento em grande escala, aumentando evidentemente os custos de operação.

A combustão da Biomassa constitui um elo importante na produção a partir da Biomassa para fornecer “produtos” na forma de calor (ou refrigeração), energia mecânica e electricidade. O calor produzido num combustor ou fornalha pode ser utilizado directamente em processos de fabrico, ou aproveitando o vapor numa caldeira, o qual pode ser expandido numa caldeira a vapor (Ciclo *Rankine*) para gerar electricidade. Outras formas, incluem o Ciclo *Brayton* nas turbinas a gás, motores *Stirling*, etc. A energia mecânica a partir destes ciclos pode ser utilizada directamente para accionar uma máquina ou um alternador (gerador síncrono) para produção de electricidade por analogia às centrais térmicas convencionais.

Nos ciclos combinados de calor e electricidade, a variante mais usual é quando a electricidade é gerada primeiro e o calor é aproveitado a partir dos gases de exaustão do processo. Ao contrário do que acontece nos combustíveis fósseis, a chave para o sucesso da combustão da Biomassa actualmente está na sua eficiência e performance a nível ambiental, isto devido à reintegração do CO₂ (dióxido de carbono) no processo de fotossíntese [72].

No sector da indústria, a combustão tem-se revelado como um processo familiar na produção de energia eléctrica, sendo os combustíveis fósseis, especialmente o carvão, a fonte primária mais empregue, ao contrário da Biomassa.

A figura 4.15 esquematiza de forma geral os diversos processos de aproveitamentos a partir da Biomassa.

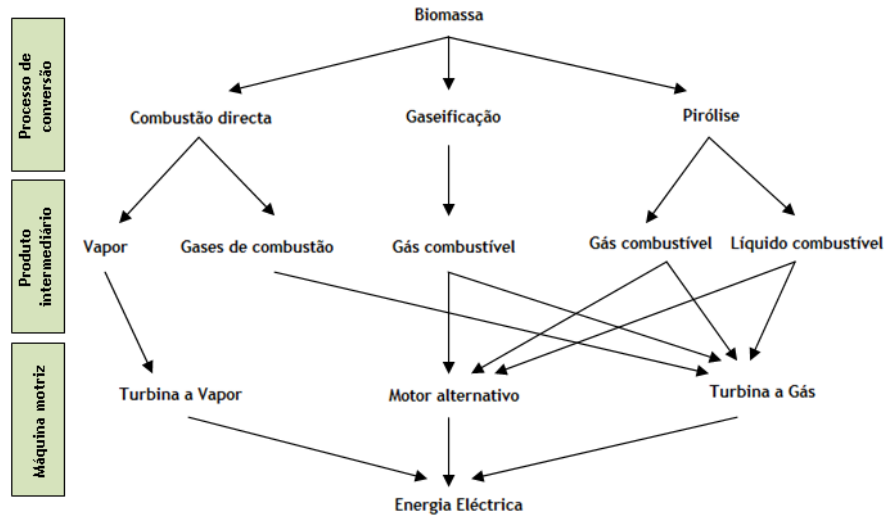


Figura 4.15 - Produção de electricidade a partir da Biomassa.

A gaseificação resulta da parcial oxidação da Biomassa a elevadas temperaturas, produzindo uma mistura gasosa inflamável de Hidrogénio (H_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4) e CO_2 . Este gás combustível pode ser utilizado como fonte primária em turbinas a gás, células de combustível ou integrado em turbina a gás num ciclo combinado [73].

A pirólise é o aquecimento de combustíveis sólidos na ausência de oxigénio, obtendo-se uma mistura de gás e líquido combustível. Apesar de ser praticado há muitos séculos na produção do carvão, a pirólise tem sido optimizada na produção de líquidos combustíveis.

O óleo pirolítico resultante deste processo é mais fácil de armazenar e transportar que a Biomassa sólida sendo queimado tal como o petróleo para produzir electricidade [71].

O uso da Biomassa em sistemas de ciclo combinado consegue aumentar os rendimentos, acima dos 50 % (ver figura 4.14). Nesta figura, indicam-se os rendimentos característicos para cada tecnologia.

Os combustíveis gasosos a partir da Biomassa incluem o biogás a partir da digestão anaeróbia e os gases provenientes de processos térmicos. Estes produtos podem ser aproveitados directamente como combustível em queimadores ou motores de combustão e turbinas a gás [72]. Os combustíveis líquidos no mercado actual são o etanol e o biodiesel.

A maioria dos sistemas de conversão da Biomassa é baseada em processos de combustão directa. A evolução para o ciclo combinado que integra a utilização do biogás permite aumentar o rendimento do sistema. Por outro lado, a combustão mista, da Biomassa com carvão, pode por sua vez aumentar a eficiência do conjunto.

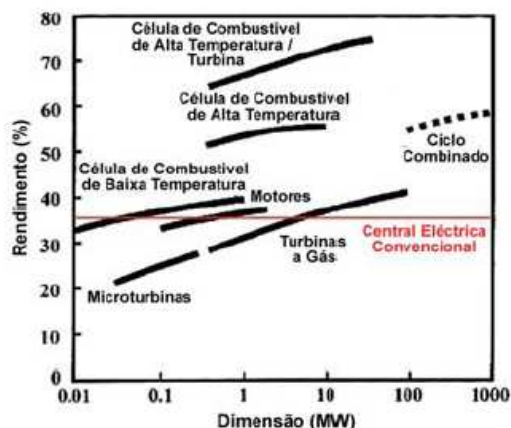


Figura 4.16 - Rendimento comparativo entre diversas tecnologias [74].

4.5.1 - Microturbinas

As microturbinas são pequenas unidades de produção eléctrica podendo adaptar-se para funcionarem com diferentes tipos de combustíveis (líquidos ou gasosos), sem quaisquer modificações significativas a realizar. A microturbina ainda é uma tecnologia relativamente cara face às tecnologias convencionais [74].

Actualmente, e comparando com as turbinas convencionais, apresentam uma potência mais reduzida (normalmente até 200 kW), um ciclo de combustão simplificado, uma menor taxa de compressão e um eixo do rotor de reduzidas dimensões, com o gerador montado numa das extremidades.

As microturbinas trabalham a elevadas rotações e, tal como a maioria das turbinas a gás, podem ser aproveitadas unicamente para produção eléctrica ou para sistemas combinados de produção de energia eléctrica e calor. As microturbinas podem constituir uma opção vantajosa para produção distribuída de electricidade e calor, devido à sua simplicidade, ao facto de serem uma tecnologia já amadurecida e devido às suas reduzidas emissões.

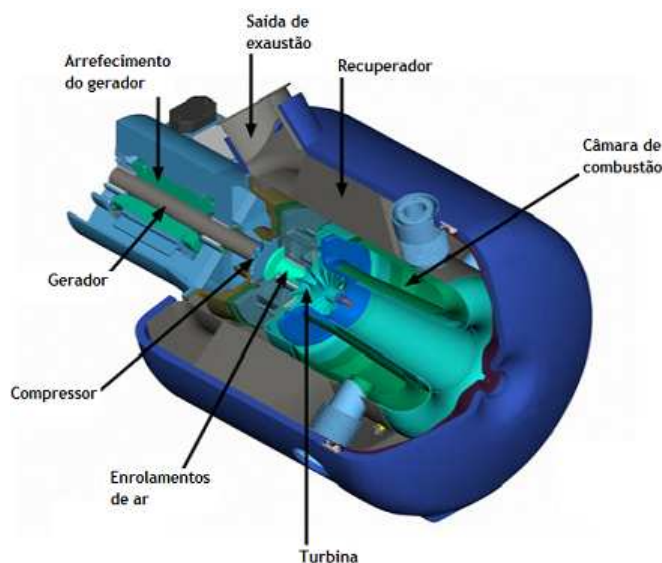


Figura 4.17 - Microturbina (Fonte: www.microturbine.com).

O princípio de funcionamento da microturbina baseia-se no facto de que parte da energia gerada pela turbina é utilizada para mover o compressor, já que ambos estão conectados ao mesmo veio. O compressor pressiona o ar para dentro da câmara de combustão na qual se forma uma mistura de ar comprimido e combustível que alimenta um processo de combustão contínuo. O gás quente e pressurizado proveniente do combustor expande-se na turbina, transformando energia térmica em mecânica.

A microturbina pode produzir energia eléctrica recorrendo a um gerador de alta velocidade (rotações) acoplado por um eixo a um turbo-compressor ou através de uma turbina acoplada a uma caixa de velocidades e utilizando um gerador eléctrico convencional (3000 rpm) (ver figura 4.18).

Na primeira configuração, é usual a utilização do gerador síncrono de ímanes permanentes e requer que a frequência da energia produzida (até 1600 Hz, que corresponde a uma velocidade angular de 96000 rpm para um gerador de 2 pólos) seja convertida para a frequência da rede eléctrica mediante o uso de electrónica de potência [75].

Outro tipo de sistema possível apresenta uma turbina com dois eixos. Nesta configuração, a turbina é conectada ao gerador eléctrico mediante uma caixa de velocidades que produz energia à frequência de 50-60 Hz [75]. No primeiro eixo é montado um gerador a gás, no qual uma turbina fornece energia mecânica exclusivamente para movimentar o compressor. Esta configuração torna a microturbina maior, mais pesada e com mais partes móveis, o que pode resultar em menor fiabilidade e maior necessidade de manutenção. Contudo, caso se consiga uma velocidade inferior a 3000 rpm, pode-se utilizar geradores síncronos ou de indução para gerar energia eléctrica em tensão com a frequência da rede, sendo desnecessário o uso da electrónica de potência [76].

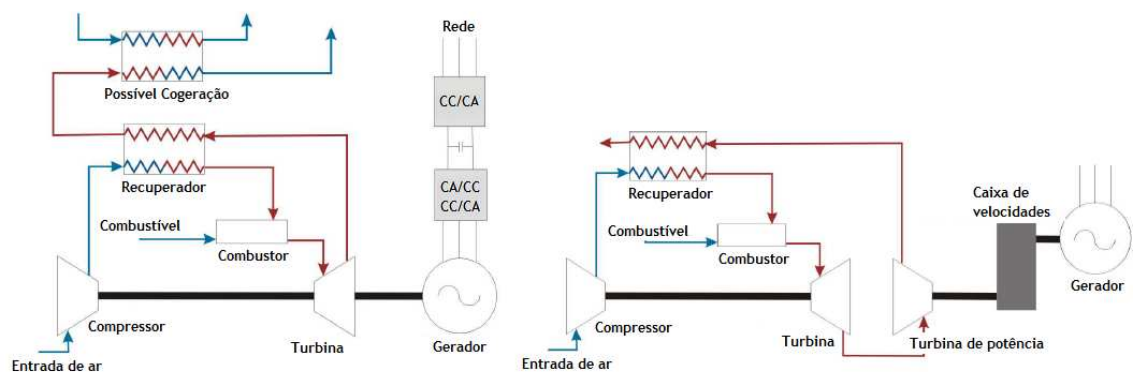


Figura 4.18 - Esquema de uma microturbina: 1 eixo (esq.) e 2 eixos (dir.) [76].

4.6 - Síntese/Conclusão

Neste capítulo foi realizado o estudo sobre os geradores eléctricos empregues nos aproveitamentos de energia renovável.

Os 4 geradores com maior aplicação são: o gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo, gerador de indução duplamente alimentado, gerador síncrono convencional e gerador síncrono de ímanes permanentes.

A electrónica de potência veio proporcionar uma melhor adaptação à variabilidade do recurso e por isso os sistemas de velocidade variável são na maioria dos casos considerados.

A energia eólica é talvez o caso onde esta evolução foi bem demonstrada. O gerador de indução convencional, pelas suas dificuldades de controlo face aos requisitos da rede, tem sido uma solução abandonada. Actualmente, a maioria dos fabricantes oferecem soluções baseadas em geradores de indução duplamente alimentados e geradores síncronos convencionais. Por outro lado, os geradores síncronos de ímanes permanentes apenas têm tido maior aplicação em aproveitamentos de baixa potência, exemplo disso, a micro eólica e as mini-hídricas surgindo contudo como hipótese de interesse crescente, inclusivé para aproveitamentos novos, como são exemplo as que se referem à energia dos oceanos.

Capítulo 5

A Máquina Síncrona

O funcionamento da máquina síncrona como gerador está hoje em dia mais do que testado e a sua utilização em centrais hidroeléctricas ou térmicas é, actualmente muito vulgar. Na prática, quase toda a energia eléctrica produzida é suportada pelos geradores síncronos. A capacidade de controlo que estes permitem, possibilitam o total ajuste face aos requisitos da rede, à qual estão interligados e à qual se destina a energia que produzem.

Mais recentemente e no domínio das energias renováveis, a utilização do gerador síncrono em aerogeradores tem tido grande aplicabilidade. O construtor mais famoso - *Enercon* - oferece uma tecnologia baseada em geradores síncronos convencionais com elevado número de pólos e conversor electrónico CA/CA, dando assim resposta às variações do recurso primário, permitindo operar a diversas velocidades de rotação, conceito ao qual, designamos de velocidade variável. Esta solução permite dispensar a caixa de velocidades, diminuindo-se as perdas mecânicas associadas a esta interface bem como os seus custos.

O gerador síncrono tem dado provas da sua aptidão em empreendimentos de grande potência, onde são exigidas soluções técnicas específicas quando ligados ao sistema eléctrico. Para soluções mais básicas, e em funcionamento isolado da rede, o gerador síncrono pode ainda ser uma boa opção face ao gerador assíncrono, apesar da sua robustez, simplicidade e baixo custo.

Este capítulo é dedicado ao trabalho experimental desenvolvidos, orientado para o estudo experimental de uma máquina síncrona trifásica convencional de pólos salientes funcionando como gerador.

A actividade experimental desenvolvida incidiu na obtenção de características de funcionamento relevantes da máquina síncrona convencional funcionando como (i) gerador isolado e (ii) gerador ligado à rede.

Por outro lado, achou-se pertinente dedicar uma parte do estudo à determinação dos parâmetros da máquina síncrona.

Para a elaboração deste estudo, recorreu-se às infra-estruturas do Laboratório de Máquinas Eléctricas I do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores (DEEC) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

5.1 - Caracterização laboratorial

O trabalho experimental realizado incidiu na determinação de parâmetros de uma máquina síncrona bem como em curvas características de funcionamento desta, enquanto gerador eléctrico. A tabela 5.1 ilustra de forma sintética, os objectivos a atingir e propostos para este trabalho.

Tabela 5.1 - Caracterização da actividade experimental.

	Objectivos	
Determinação de Parâmetros da Máquina Síncrona	Resistência do induzido; Reactâncias síncronas em regime permanente e transitório; Constantes de tempo para regime transitório	
Características de funcionamento em carga	Rede isolada	Sem regulação de tensão
		Com regulação de tensão
	Paralelo com a rede	Regulação de P
		Regulação de Q
		Curvas em V
Diagrama de limites de funcionamento da máquina síncrona		

Para o funcionamento da máquina como gerador, utilizou-se, para uma máquina primária, um motor de indução trifásico alimentado através de um conversor de frequência, permitindo assim, variar a sua velocidade de rotação (ver figura 5.1).

O acoplamento entre a máquina primária e o gerador exigiu o correcto ajustamento dos veios na plataforma de ensaio, de forma a garantir-se a adequabilidade dos ensaios.

O sistema de excitação (ou excitatriz) empregue para excitação do gerador síncrono é um sistema alimentado a corrente alternada com rectificação para corrente contínua, com corrente máxima de 10 A.

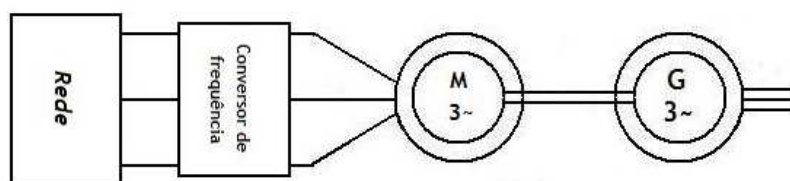


Figura 5.1 - Controlo da máquina primária acoplada à máquina síncrona.

Os valores por unidade (p.u.) apresentados têm em conta os valores base considerados, encontrando-se no anexo A.

As características da máquina primária e do gerador são apresentadas nas tabelas 5.2 e 5.3, respectivamente.

Tabela 5.2 - Chapa de características da máquina primária.

P_n (kW)	U_n (V)	f_n (Hz)	I_n (A)	$\cos \varphi_n$	n_n (r/min)
5,5	400	50	10,6	0,85	1465
IP	Tipo	Classe Isol.	Ligação	Fabricante	
55	BM61401	F	Δ	WEG	

Tabela 5.3 - Chapa de características do gerador síncrono.

S (kVA)	U_n (V)	f_n (Hz)	I_n (A)	$\cos \varphi_n$	n_n (r/min)
6,5	400	50	9,4	0,8	1500
Número	Tipo	Classe Isol.	Ligação	Fabricante	
81304070EXZ	GT4S-S	F	Y	SINCRO	

Para os ensaios laboratoriais recorreu-se também a um conjunto de equipamentos, indicados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Principais equipamentos utilizados.

Descrição	Características
Conversor de frequência	CFW08 WEG
Carga resistiva	Potência: 4 kW
	Monofásico: 230 V
	Trifásico: 230/400 V
Carga indutiva	Potência: 4 kVar
	Monofásico: 230 V
	Trifásico: 230/400 V
Carga capacitiva	Potência: 4 kVar
	Monofásico: 230 V
	Trifásico: 230/400 V
Analizador de Potência	Norma AC Power Analyzer D5255 M
Sincronoscópio	Marca: "Iduca"

Para além destes equipamentos, foram utilizados outros aparelhos de medição tais como: voltímetros, amperímetros, wattímetros, taquímetro para análise da velocidade de rotação do veio e osciloscópios (Tektronix TDS 1001B).

5.2 - Determinação experimental dos parâmetros

5.2.1 - Resistência por fase do estator

A aplicação do método do Voltímetro-Amperímetro permitiu a determinação da resistência do induzido, por fase, da máquina síncrona. Este método não é mais do que a aplicação da Lei de Ohm a um circuito constituído por uma fonte de corrente contínua (12 V), no qual a circulação de uma corrente regulável por uma resistência possibilita a medida de diversos valores de tensão V e corrente I . O esquema de montagem é representado na figura 5.2. A medição realizada diz respeito à resistência entre fases, ou dito de outro modo, ao valor da resistência série dos dois enrolamentos considerados na medição.

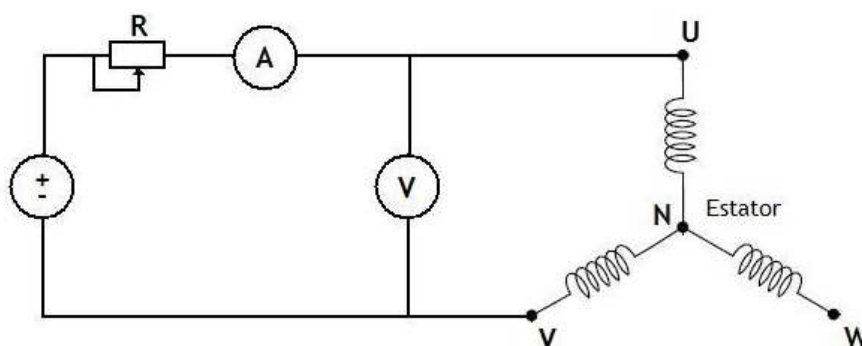


Figura 5.2 - Método do Voltímetro-Amperímetro.

O procedimento realizado em laboratório constitui na medida dos valores de V e I para as várias combinações de fase (UV, VW e UW), permitindo o cálculo da resistência do enrolamento pela aplicação da expressão 5.1.

$$R_1 = \frac{R_{UV} + R_{UV} + R_{VW}}{6} \quad (5.1)$$

$\Leftrightarrow$

$$R_1 = \frac{5,17 + 5,19 + 5,17}{6} = 2,59\Omega = 0,1 p.u.$$

O valor assim calculado, à temperatura ambiente (17 °C) registada, necessita de correcção para a temperatura de referência correspondente à Classe de Isolamento da máquina (Classe F). Este valor é estimado com base na expressão 5.2, onde:

$R_{T_{ref}}$: resistência por fase do induzido para a temperatura de referência,

$R_{T_{amb}}$: resistência por fase do induzido 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

$$R_{(T_{ref})} = \frac{\alpha + T_{ref}}{\alpha + T_{amb}} R_{(T_{amb})} \quad (5.2)$$

$\Leftrightarrow$

$$R_{(T_{ref})} = \frac{235+155}{235+17} \times 2,59 = 4\Omega = 0,16 p.u.$$

5.2.2 - Reactâncias síncronas

5.2.2.1 - Reactância síncrona longitudinal

A determinação da reactância síncrona longitudinal X_{sd} é passível de ser determinada pela combinação da característica de saturação em vazio obtida no ensaio de funcionamento em vazio e da característica de curto-circuito resultante do ensaio de curto-circuito permanente e simétrico.

Uma característica importante no funcionamento em vazio da máquina síncrona é a designada característica de saturação em vazio $U_o = f(I_e)$ que também recebe a designação de característica interna em vazio $E_o = f(I_e)$. Uma vez que a máquina funciona em vazio, não existe qualquer corrente no induzido, não existindo portanto, queda de tensão interna, sendo a força electromotriz E_o da máquina síncrona equivalente à tensão U_o aos seus terminais. Também será nulo o campo magnético de reacção do induzido.

A figura 5.3 ilustra a montagem efectuada no laboratório para o ensaio em vazio.

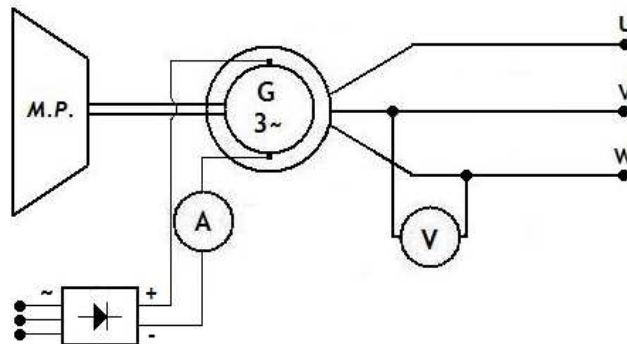


Figura 5.3 - Esquema de montagem: ensaio em vazio.

Esta característica expressa a força electromotriz (f.e.m) da máquina em função da corrente de excitação, para uma velocidade de rotação n constante. Estando a máquina desligada da carga e rodando a velocidade constante, é possível obter-se esta característica variando gradualmente a corrente de excitação correspondente à tensão aproximada de $1,3 U_n$ até ao valor zero.

A figura 5.4 ilustra a característica interna em vazio da máquina síncrona para a velocidade nominal ($n=1500$ rpm).

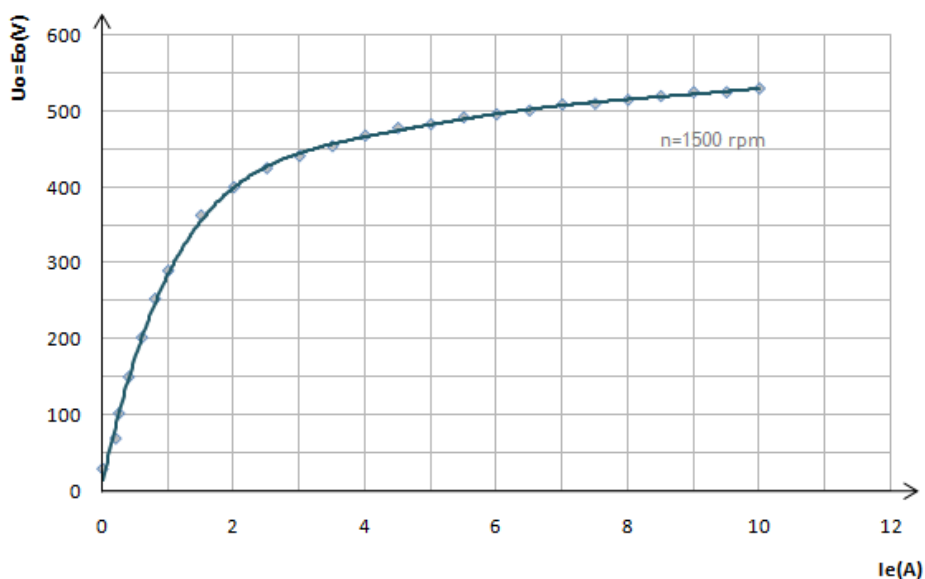


Figura 5.4 - Característica interna em vazio.

Esta curva assemelha-se bastante à curva de magnetização de um circuito ferromagnético, sendo caracterizada essencialmente por uma zona linear e uma outra de saturação. É de salientar que para a situação em que a máquina síncrona se encontra desexcitada, existe uma pequena força electromotriz que tem origem no fluxo remanescente existente da máquina.

O cálculo da reactância síncrona longitudinal exige a determinação adicional da característica de curto-circuito. Neste ensaio, estando a máquina síncrona a rodar à velocidade nominal (1500 rpm) accionada pela máquina primária e estando aquela não excitada ($I_e = 0$) inicialmente, é regulada a corrente de excitação desde zero até a um valor suficiente para provocar uma corrente no induzido que deve exceder o valor nominal e que no nosso caso se decidiu ser de $1,3 I_n$.

A figura 5.5 ilustra o esquema de montagem realizado para a obtenção da característica de curto-circuito.

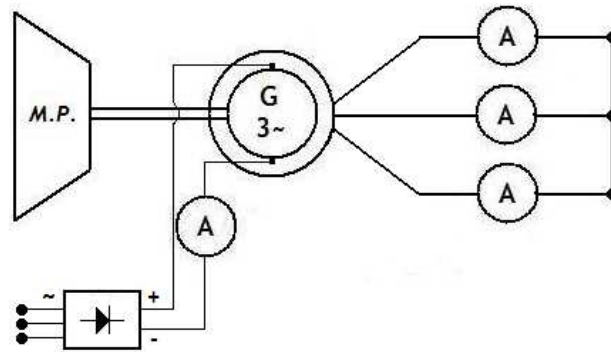


Figura 5.5 - Esquema de montagem: ensaio em curto-circuito.

A figura 5.6 ilustra a característica de curto-circuito $I_{cc} = g(I_e)$ obtida.

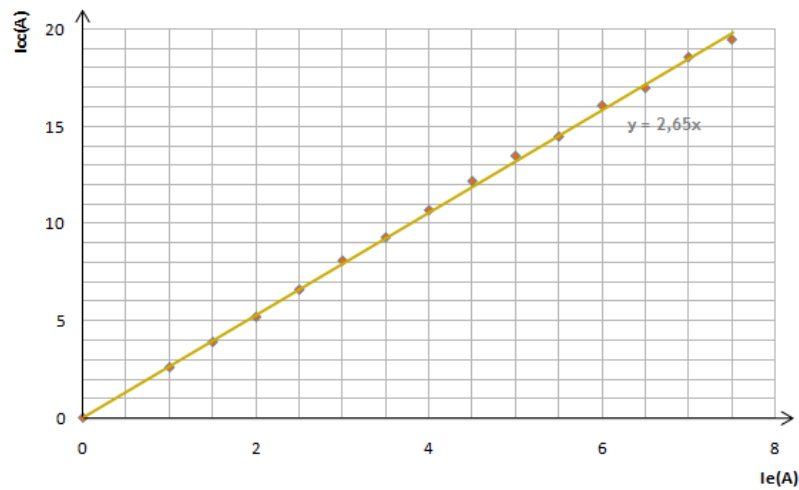


Figura 5.6 - Característica de curto-circuito.

O cociente entre a tensão simples E_o e o valor da corrente de curto-circuito I_{cc} permite-nos determinar o valor da impedância síncrona, a partir da qual se obtém o valor da reactância síncrona longitudinal. Deve-se salientar-se um aspecto adicional: tanto E_o como I_{cc} dependem da corrente de excitação e, por conseguinte, também o seu quociente (equação 5.3).

$$Z_s = \frac{E_o}{I_{cc}} \bigg|_{I_e = x} \quad (5.3)$$

A figura 5.7 ilustra simultaneamente as curvas obtidas no ensaio em vazio e em curto-circuito, bem como uma terceira, a traço descontínuo, que representa a obtenção da curva Z_s em função da corrente de excitação I_e . Note-se o carácter linear da característica de curto-circuito $I_{cc} = g(I_e)$ para as correntes aqui consideradas, demonstrando que a máquina não atingiu o estado de saturação magnética resultante do baixo fluxo magnético alcançado em consequência do forte efeito desmagnetizante do campo de reacção do induzido nas condições de curto-circuito.

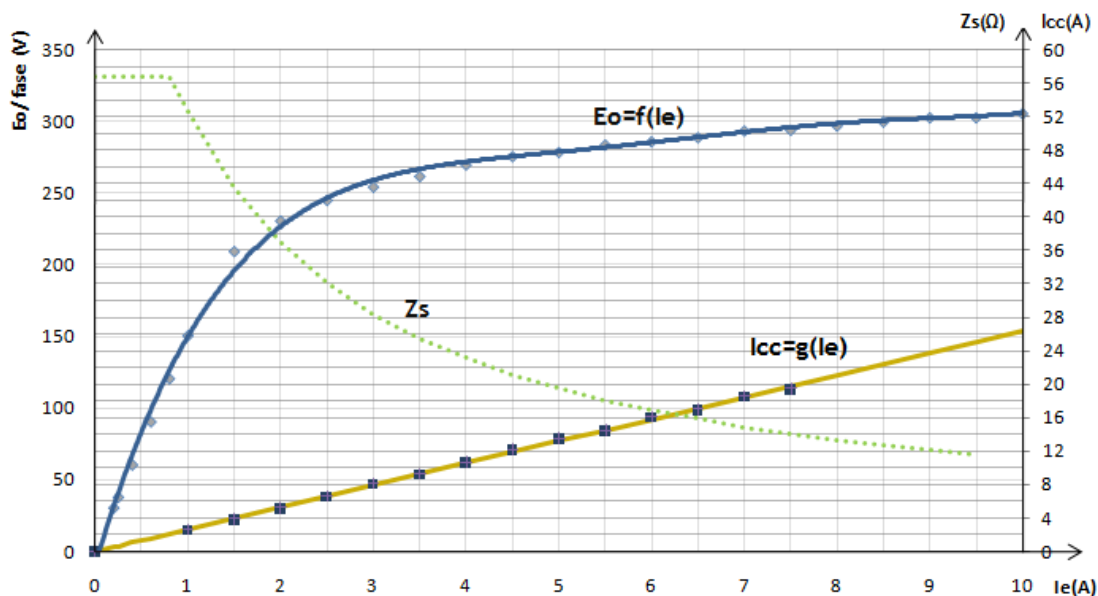


Figura 5.7 - Característica de vazio e de curto-circuito.

Cálculo da impedância síncrona.

A determinação da impedância síncrona na zona de não saturação exigiu a linearização da curva em vazio com início na origem (ver figura 5.8). Este tratamento foi necessário de forma a conseguir-se obter um valor de impedância síncrona constante e de igual valor para correntes de excitação baixas (zona de não saturação).

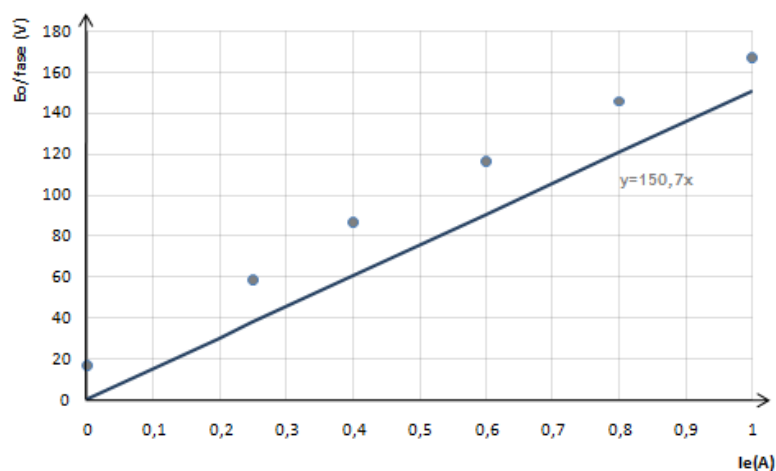


Figura 5.8 - Linearização da característica em vazio.

O valor obtido para a impedância síncrona não saturada foi (ver tabela B.3, anexo B):

$$Z_s = 57\Omega = 2,3p.u.$$

Na prática, estando a máquina a trabalhar em zonas de saturação, o comportamento da máquina, utilizando a impedância anterior diferia muitas das vezes do valor real em condições normais de funcionamento, pelo qual deve-se utilizar um valor mais adequado para a impedância síncrona.

Nas diferentes normas propostas pelas comissões electrotécnicas dos diferentes países, é habitual tomar-se o valor da designada impedância síncrona saturada que consiste em partir da tensão nominal, à qual corresponde uma determinada corrente de excitação e que produziria uma determinada corrente no induzido.

A figura B.1 (Anexo B) ilustra à escala as curvas de vazio e curto-circuito, a partir das quais se determinou a impedância síncrona saturada. Para a tensão nominal da máquina (400V) corresponde uma corrente de excitação de 2,0 A e para este valor corresponde uma corrente de curto-circuito de 5,2A. Deste modo, o cálculo da impedância síncrona obedece à expressão 5.3, obtendo-se:

$$Z_s(\text{saturada}) = \frac{\left(\frac{400}{5,2}\right)}{\sqrt{3}} = 44\Omega = 1,79p.u.$$

Na prática, sendo o valor da resistência do induzido inferior à reactância ($X_s \approx 10R_l$), o valor desta última é praticamente igual à impedância síncrona.

$$Z_s = |R_l + jX_s| \quad (5.4)$$

$$\Leftrightarrow$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_l^2} \approx Z_s \quad (5.5)$$

5.2.2.2 - Reactância síncrona transversal

A determinação da reactância síncrona transversal é obtida experimentalmente pelo ensaio com baixo deslizamento.

Neste ensaio, estando o rotor a girar estavelmente fora da velocidade de sincronismo (com deslizamento inferior a 1%) e aplicando um sistema trifásico de tensões ao estator de frequência nominal, f_n , irá criar-se um campo girante, rodando à velocidade de sincronismo $\omega_s = 2\pi f_n$. Nestas condições, para além de a única força f.m.m presente ser a estatórica,

uma vez que o enrolamento indutor é mantido em circuito aberto, isto é, $I_e = 0A$, o rotor irá tomar todas as posições espaciais possíveis face a tal f.m.m, passando nomeadamente por duas situações extremas, correspondentes ao alinhamento do eixo directo do rotor com o campo girante e alinhamento do eixo directo do rotor em quadratura com o campo girante (ver figura 5.10 (a) e 5.10 (b) respectivamente).

A figura 5.9 ilustra o esquema de montagem efectuada para o ensaio com baixo deslizamento.

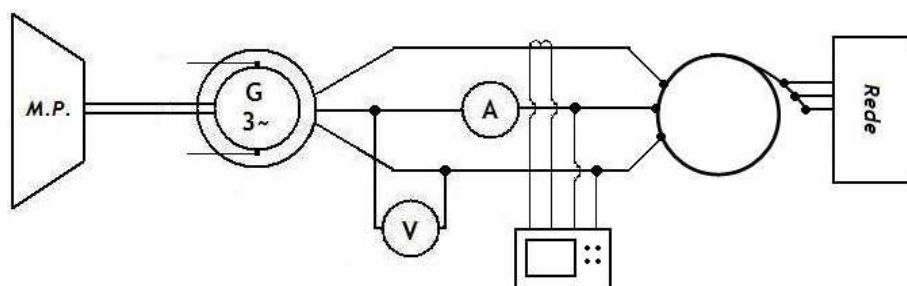


Figura 5.9 - Esquema de montagem: ensaio com baixo deslizamento.

As posições tomadas pelo rotor relativamente ao campo girante irão determinar o valor da impedância “oferecidas” pelo estator, podendo-se observar:

- Quando o campo girante se alinha pelo eixo dos pólos, o circuito magnético apresenta uma relutância mínima, figura 5.10 (a) e, por isso, a impedância da máquina vista pela rede de alimentação tomará o seu valor máximo e praticamente igual ao valor da sua reactância síncrona longitudinal (desprezando a resistência do induzido, R_l).

$$Z_{sd} = \frac{U_{\max}}{I_{\min}} \quad (5.6)$$

- Quando o campo girante se orienta com uma posição em quadratura relativamente ao eixo dos pólos, o circuito magnético apresenta uma relutância máxima, figura 5.10 (b) e, por isso, a impedância da máquina será mínima, praticamente igual ao valor da sua reactância síncrona transversal (desprezando a resistência do induzido, R_l).

$$Z_{sq} = \frac{U_{\min}}{I_{\max}} \quad (5.7)$$

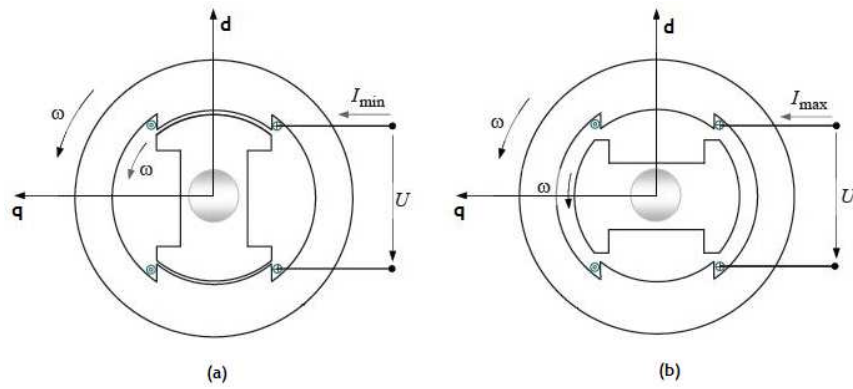


Figura 5.10 - Ensaio com baixo deslizamento: alinhamento do rotor relativamente ao campo girante.

Sendo a variação da impedância da máquina compreendida entre um valor mínimo (X_{sq}) e máximo (X_{sd}), o mesmo sucederá à tensão em cada uma das fases bem como à corrente absorvida por cada uma das fases estáticas (ver figura 5.11).

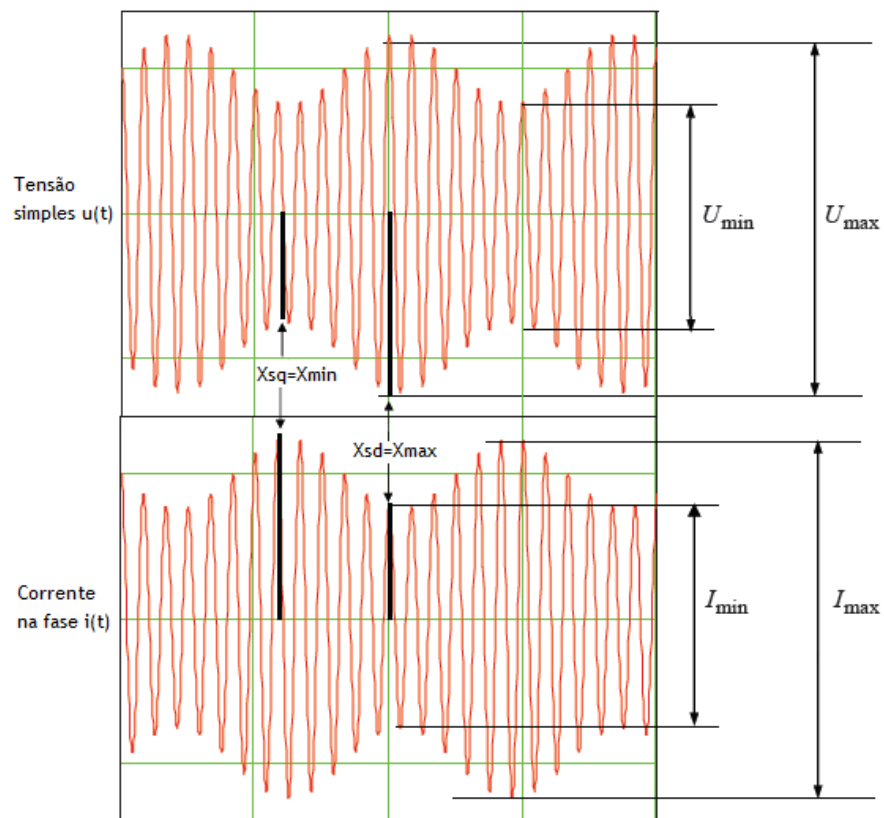


Figura 5.11 - Oscilogramas típicos do ensaio com baixo deslizamento.

As dificuldades em termos práticos na realização e interpretação dos resultados levam a que apenas seja considerado a determinação da reactância síncrona transversal a partir deste ensaio, preferindo-se uma solução alternativa para a determinação da reactância síncrona longitudinal (ensaio em vazio e ensaio em curto-circuito trifásico permanente).

A evolução temporal obtida experimentalmente, quer para a tensão aplicada $u(t)$ a uma fase, quer da intensidade de corrente $i(t)$ por ela absorvida, é apresentada na figura 5.12. A análise ao registo oscilográfico permite-nos determinar os mínimos e máximos das duas formas de onda.

$$U_{\min} = 92,4V, \quad U_{\max} = 105,6V, \quad I_{\min} = 5A, \quad I_{\max} = 7A$$

Estes valores foram obtidos tendo em conta os factores multiplicativos dos aparelhos de registo (embora não houvesse necessidade de tal já que, como se observa na expressão 5.8 adiante empregue, são relevantes só os quocientes de tensões e correntes extremos, que são adimensionais).

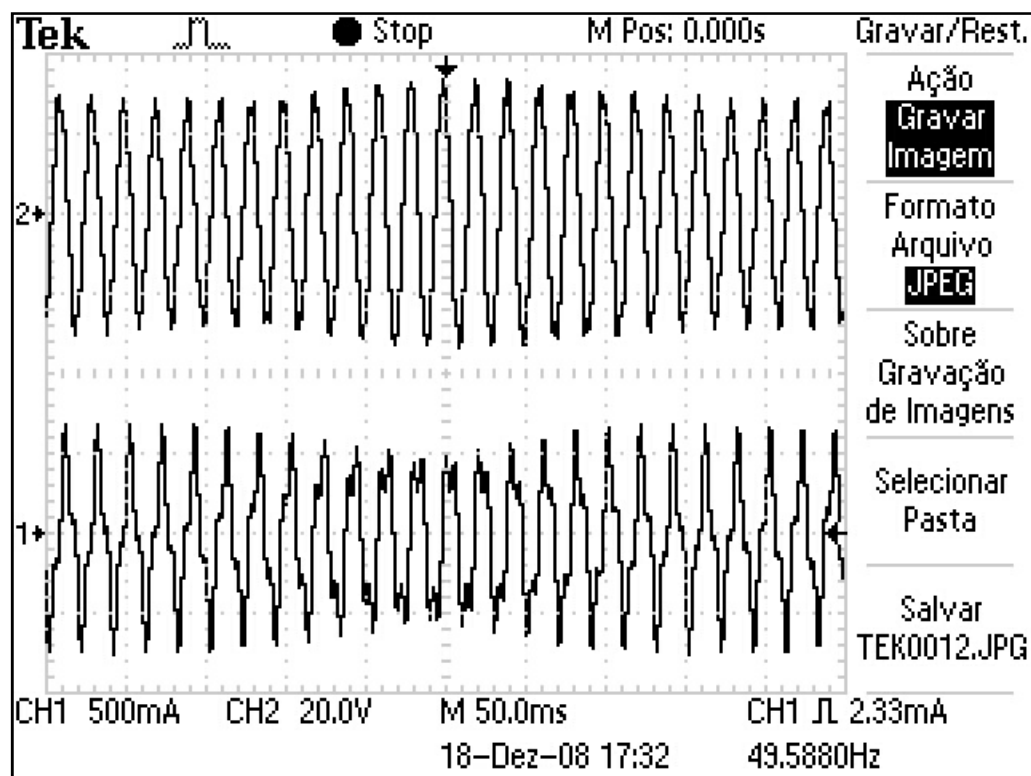


Figura 5.12 - Formas de onda da tensão (2) e da corrente (1) obtidas experimentalmente.

A combinação das equações 5.6 e 5.7 permite-nos obter a seguinte relação:

$$\frac{Z_{sd}}{Z_{sq}} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (5.8)$$

A determinação da reactância síncrona Z_{sd} (não saturada) a partir dos ensaios em vazio e em curto-circuito pode ser integrada na equação 5.8, podendo ser determinada a partir do conhecimento dos valores mínimos e máximos de U e I , o valor da impedância síncrona transversal. Do exposto acima, resulta:

$$Z_{sq} = Z_{sd} \frac{U_{\min}}{U_{\max}} \frac{I_{\min}}{I_{\max}} = 57 \frac{92,5}{105,6} \frac{5}{7} = 36\Omega = 1,46 p.u.$$

A simplificação que é feita, desprezando o valor da resistência do induzido, leva-nos a admitir que o valor da reactância síncrona transversal é praticamente igual à impedância síncrona Z_{sq} .

5.2.2.3 - Reactância síncrona transitória e subtransitória longitudinal

A condição transitória resultante do curto-circuito trifásico aos terminais do gerador síncrono constitui o caso mais severo para estas. Os fenómenos físicos associados a estes transitórios dão lugar à definição de parametrizações próprias, que têm uma importância significativa na compreensão dos transitórios ocorridos nestas máquinas. Neste contexto têm significado especial as reactâncias síncronas transitórias e subtransitória bem como as constantes de tempo associadas.

A determinação das reactâncias síncronas transitórias longitudinais é feita experimentalmente pelo ensaio de curto-circuito trifásico brusco. De facto, segundo as normas internacionais da Comissão Electrotécnica Internacional (CEI), este método é preferencial para a obtenção de tais parâmetros o qual será por nós seguido.

O ensaio a que nos propusemos foi realizado, criando um curto-circuito trifásico brusco aos terminais da máquina síncrona, estando esta a funcionar em vazio e à velocidade nominal (1500 rpm). A excitação da máquina síncrona é obtida a partir de uma excitatriz, que por sua vez, é excitada separadamente. Na realização deste ensaio foi substituído o sistema de excitação existente (ver secção 5.1), integrando-se uma máquina de corrente contínua funcionando como gerador, e excitado separadamente. Deste modo, poder-se-á regular a corrente de excitação, pelo controlo do gerador de corrente contínua, permitindo-nos ajustar a tensão aos terminais da máquina síncrona.

A figura 5.13 ilustra o esquema de montagem empregue para o ensaio de curto-circuito trifásico brusco.

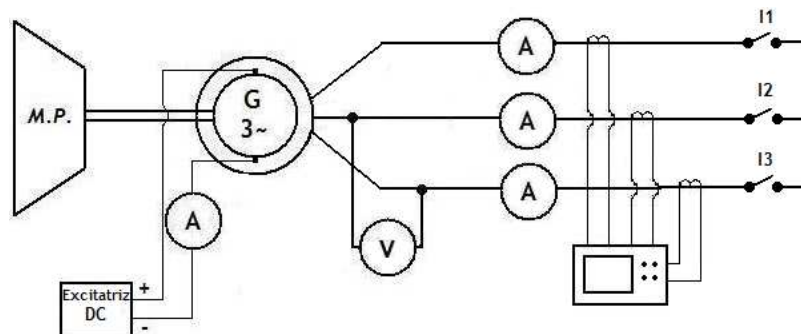


Figura 5.13 - Esquema de montagem: ensaio de curto-circuito trifásico brusco.

O ensaio realizado foi ajustado de modo a regular-se a corrente de excitação e obter-se uma tensão aos terminais de cerca de $0,5U_n$. A escolha deste nível de tensão permitirá a obtenção dos parâmetros correspondente ao estado não saturado.

O registo oscilográfico da corrente de curto-circuito em cada fase é então obtido de forma a obter-se a forma de onda para o tempo especificado na amostra do sinal. Por outro lado, os dados obtidos pelo osciloscópio em formato *.TXT permitem a posterior análise e tratamento dos dados. As formas de onda da corrente de curto-circuito para todas as fases, que se encontram no anexo D, foram obtidas pelo programa *Microsoft Excel*.

A figura 5.14 ilustra as formas de ondas registadas experimentalmente para a corrente de curto-circuito em duas fases. A aquisição das formas de onda foi obtida retirando-lhe a componente contínua do sinal, que será útil para posterior tratamento.

Nas formas obtidas é notório o comportamento da forma de onda nos períodos transitórios e que tendem para um valor de amplitude constante, período ao qual, designamos de regime permanente.

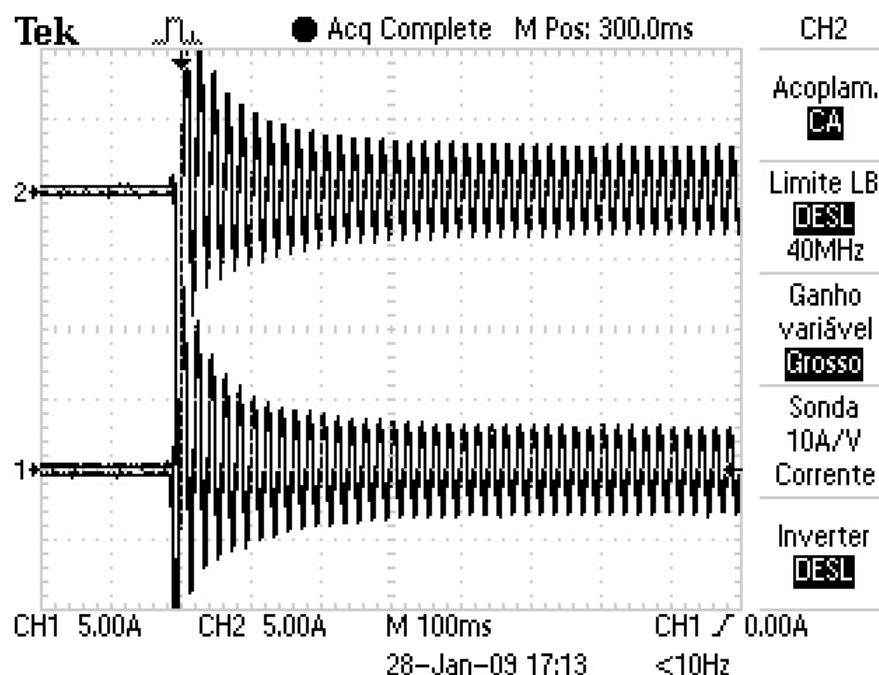


Figura 5.14 - Registo oscilográfico: corrente de curto-circuito.

Na realidade, uma análise cuidadosa à componente alternada da corrente de curto-circuito na parte transitória permite-nos identificar que, nos instantes iniciais, esta componente tem uma amplitude muito elevada e decai muito rapidamente, correspondendo ao período subtransitário. Findo este período, a corrente segue diminuindo mais lentamente, até alcançar um regime permanente final constante, correspondendo ao período transitório.

A figura 5.15 ilustra a corrente de curto-circuito para uma fase após tratamento dos dados, sendo possível verificar, a partir dos 300 ms, o período estacionário ou permanente. A curva envolvente a esta é obtida, tomando os valores máximos e mínimos (em módulo) da respectiva forma de onda.

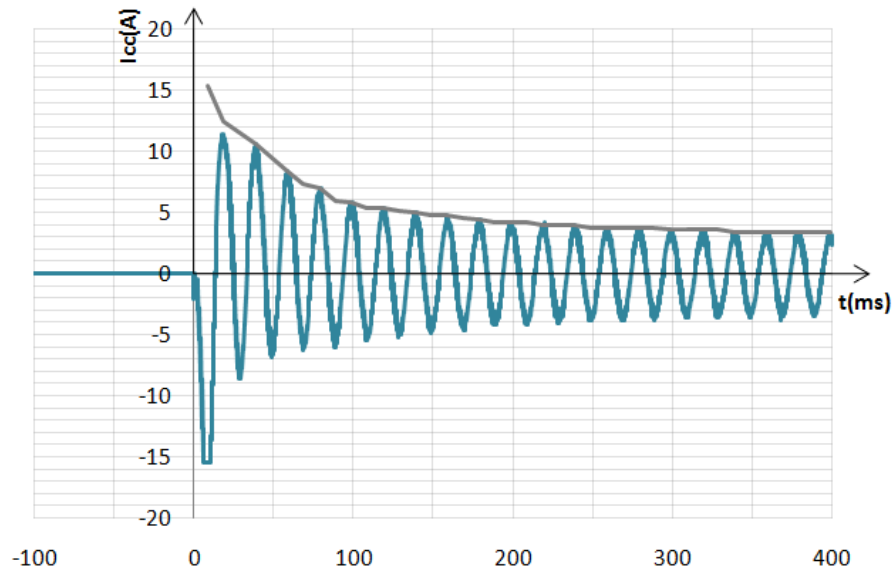


Figura 5.15 - Corrente de curto-circuito numa fase e curva envolvente.

A determinação da componente transitória $\Delta i_k'$ e subtransitória $\Delta i_k''$ é determinada pela curva envolvente (figura 5.15), subtraindo a esta a componente periódica da corrente de curto-circuito em regime permanente $i(\infty)$. Esta nova curva é representada numa escala semi-logarítmica (figura 5.16).

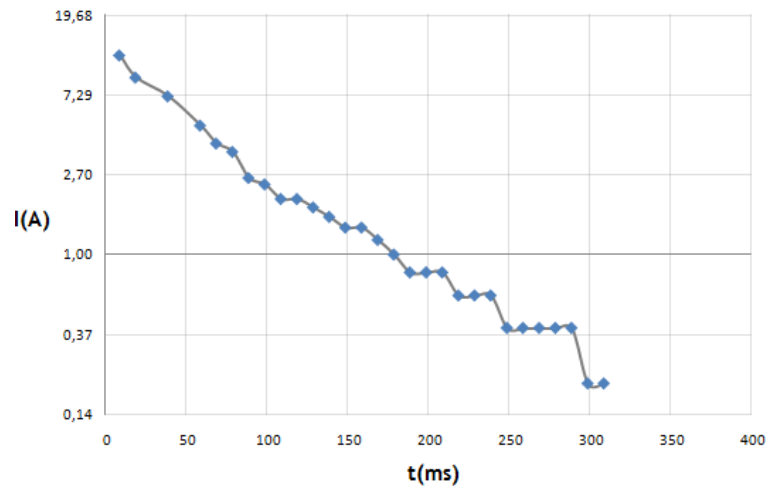


Figura 5.16 - Corrente de curto-circuito em escala semi-logarítmica.

A curva obtida (em escala semi-logarítmica) permite obter o valor da componente transitória, onde a sua extrapolação até ao instante $t=0$ ms dá o valor inicial desta. Este valor é definido com base na linearização desta curva a partir de instantes t (ms) onde os fenómenos subtransitórios são desprezáveis. A figura 5.17 ilustra a linearização da curva de corrente logaritmicada, onde são indicados os dois pontos para a aproximação.

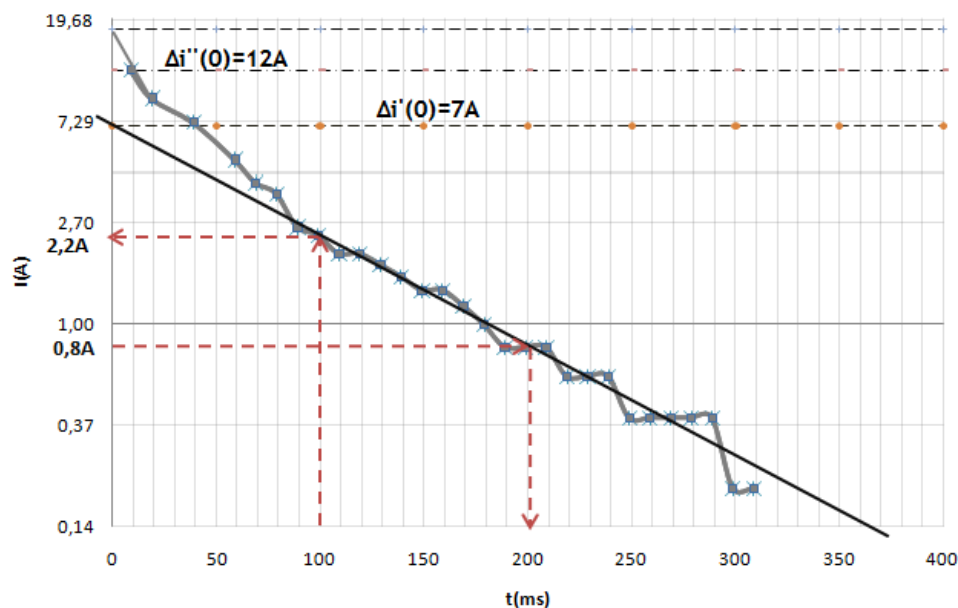


Figura 5.17 - Linearização da componente aperiódica da corrente de curto-circuito.

Os dois pontos definidos para a aproximação linear correspondem ao ponto A correspondente ao tempo $t=100$ ms, e ao ponto B para o qual a corrente é $i_B = (1/\varepsilon)i_A$ sendo $(1/\varepsilon) = 0,368$. Os valores registados por inspecção à figura permitiu registar os seguintes valores:

$$i_A|_{t=100\text{ms}} = 2,2A$$

$$i_B = \frac{1}{\varepsilon} i_A = 0,368 \times 2,2 = 0,8A$$

O tempo correspondente ao ponto B é $t = 200$ ms. A constante de tempo transitória longitudinal é definida como sendo $\tau' = (OB - OA)$ e correspondendo ao tempo necessário para que a componente transitório decresça $1/\varepsilon$ do seu valor inicial. A constante de tempo transitória longitudinal é então $200 - 100 = 100$ ms.

O prolongamento da recta até ao instante $t = 0$ ms dá o valor da componente transitória inicial $\Delta i_k'(0)$ de curto-circuito que é de 7 A.

A componente subtransitória inicial $\Delta i_k''(0)$ da corrente de curto-circuito é obtida subtraindo a componente $\Delta i_k'$ à curva original da corrente de curto-circuito para o instante $t=0$ ms que será o valor que nos interessa para a determinação da reactância subtransitória, resultando em $\Delta i_k''(0) = 19 - 7 = 12$ A.

A constante de tempo subtransitória é definida como sendo o tempo necessário da componente subtransitória decrescer até $(1/\varepsilon)$ do valor inicial, dando um valor de 45 ms.

O cálculo dos parâmetros transitórios longitudinais da máquina síncrona é obtido de acordo com as expressões 5.9 e 5.10.

$$X_d' = \frac{U(0)}{\sqrt{3}[i(\infty) + \Delta i_k'(0)]} \quad (5.9)$$

$$X_d'' = \frac{U(0)}{\sqrt{3}[i(\infty) + \Delta i_k'(0) + \Delta i_k''(0)]} \quad (5.10)$$

Onde $U(0)$ é o valor da tensão aos terminais da máquina imediatamente antes do curto-circuito.

$$X_d' = \frac{200}{\sqrt{3}[3,4 + 7,0]} = 11,10\Omega = 0,45 p.u.$$

$$X_d'' = \frac{200}{\sqrt{3}[3,4 + 7,0 + 12]} = 5,15\Omega = 0,21 p.u$$

O próprio sistema de aquisição do sinal poderá contribuir para a obtenção de resultados pouco confiáveis na medida em que no tratamento dos dados realizados, observou-se uma discretização muito acentuada do sinal da corrente de curto-circuito. Este comportamento é observável a partir da figura 5.16.

5.2.2.4 - Reactância subtransitória longitudinal e transversal

A determinação da reactância síncrona longitudinal e transversal subtransitória é passível de ser obtida também pelo ensaio de aplicação de uma tensão nas posições longitudinal e transversal do eixo dos pólos em relação ao campo do induzido. Aliás o método anteriormente empregue só se adequa à determinação de X_d' e X_d'' .

Nestas condições, o enrolamento de excitação é curto-circuitado e o rotor é colocado manualmente de forma a determinar-se as duas posições angulares correspondentes ao valor máximo e aproximadamente nulo da corrente no enrolamento de excitação, as quais coincidem com o eixo longitudinal e transversal respectivamente.

Para cada umas das posições é registado a tensão de alimentação, a corrente no induzido e a potência absorvida.

A figura 5.18 ilustra o esquema de montagem efectuada para o ensaio realizado.

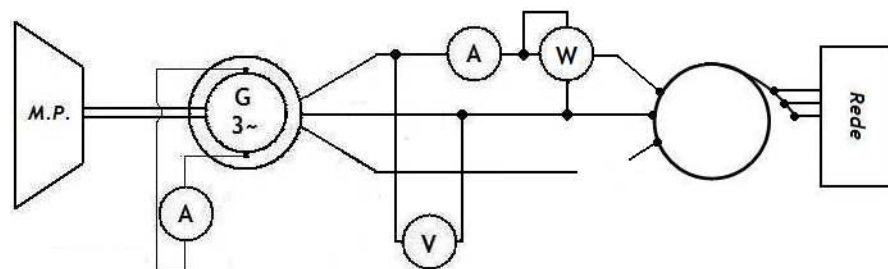


Figura 5.18 - Esquema de montagem: aplicação de tensão nas 2 posições do eixo dos pólos.

Os resultados obtidos para ambas as situações encontram-se na tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Resultados obtidos para as 2 posições do eixo do rotor.

$I_e(A)$	$I(A)$	$U(V)$	$P(W)$
0	9,4	400	840
2,25	9,4	220	600

A reactância subtransitória longitudinal é determinada, segundo as normas da CEI, a partir das expressões:

$$X_d'' = \sqrt{Z_d''^2 - R_d''^2} \quad (5.11)$$

Onde:

$$Z_d'' = \frac{U}{2I} \quad (5.12)$$

e

$$R_d'' = \frac{P}{2I^2} \quad (5.13)$$

Por outro lado, a reactância subtransitória transversal é determinada aplicando as mesmas expressões para o caso onde a corrente de excitação é mínima e que corresponderá à passagem do rotor na posição transversal.

Seguindo este algoritmo, obteve-se, finalmente:

$$X_d'' = 11,2\Omega = 0,45 p.u.$$

$$X_q'' = 20,7\Omega = 0,8 p.u.$$

5.3 - Determinação de características de funcionamento em carga

5.3.1 - Funcionamento como gerador isolado da rede

5.3.1.1 - Sem regulação de tensão

O ensaio realizado teve como objectivo verificar o comportamento da tensão gerada com o aumento da carga. Nesta situação, foram alimentadas três regimes de cargas reguláveis e factores de potência constantes. O ensaio foi realizado para um valor de frequência igual a 50 Hz, mantido constante ao longo do ensaio pela actuação no conversor de frequência ligado à máquina primária.

A figura 5.19 ilustra o esquema de montagem utilizado para o ensaio em carga, com e sem regulação de tensão.

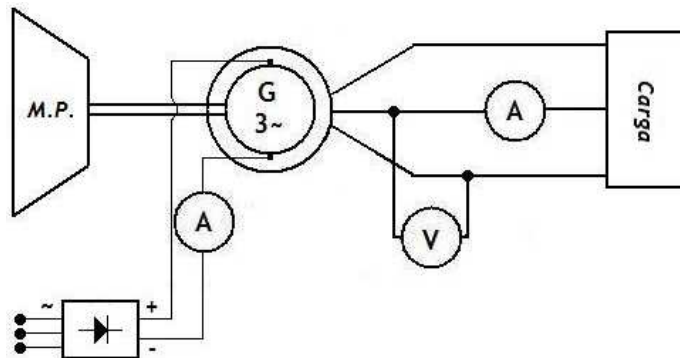


Figura 5.19 - Esquema de montagem: ensaio em carga.

A curva que representa a tensão aos terminais do gerador em função da corrente de carga é designada por característica externa. Os resultados registados possibilitaram a elaboração destas características $U = f(I)$ para três tipos de cargas (ver figura 5.20).

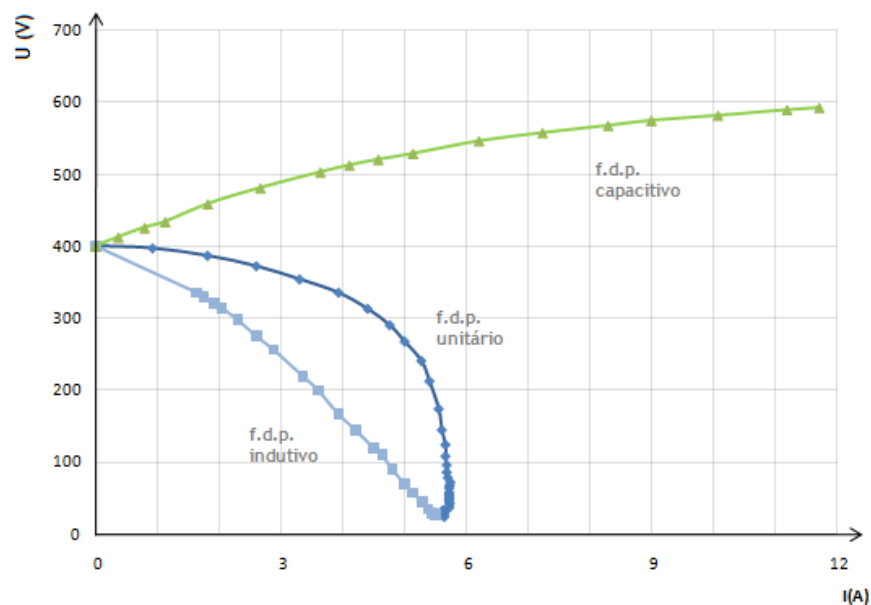


Figura 5.20 - Característica externa da máquina síncrona.

Inicialmente, partiu-se de um valor de corrente de excitação I_e de tal modo que se obtém, em vazio, a tensão nominal da máquina (400 V).

A observação à figura 5.20 permite claramente concluir que, quer para cargas resistivas, quer para cargas indutivas, o valor da tensão vai diminuindo com o aumento do valor da carga. Para cargas capacitivas, a tensão aumenta com a intensidade de corrente, isto é, da carga.

Esta variação pode ser explicada pelo surgimento de uma corrente no induzido que provoca uma queda de tensão devido à impedância que este possui bem como pela acção do campo magnético de reacção do induzido, criado pela corrente que circula no respectivo enrolamento e que tem, como se sabe, efeito desmagnetizante ou magnetizante consoante aquela corrente que possui natureza indutiva ou capacitiva, respectivamente.

As cargas capacitivas têm um efeito de reforço sobre a f.m.m do induzido, ao contrário das cargas indutivas, que têm um efeito antagonista (desmagnetizante) que tende a reduzir a f.m.m resultante, diminuindo o fluxo no entreferro e provocando como consequência uma redução da f.e.m induzida.

5.3.1.2 - Com regulação de tensão

Este ensaio teve por finalidade estudar o controlo de tensão no gerador síncrono com a variação de carga. O ensaio realizado anteriormente permitiu-nos avaliar o comportamento da tensão perante o aumento de três tipos de cargas (resistiva, indutiva e capacitiva).

Se se deseja manter a tensão aos terminais da máquina ao variar a corrente de carga, será necessário variar de forma adequada a correspondente excitação.

As curvas que representam as relações entre a corrente de excitação I_e e a corrente de carga para uma tensão de saída constante e igual a U_n estão indicadas na figura 5.21 para diversos factores de potência.

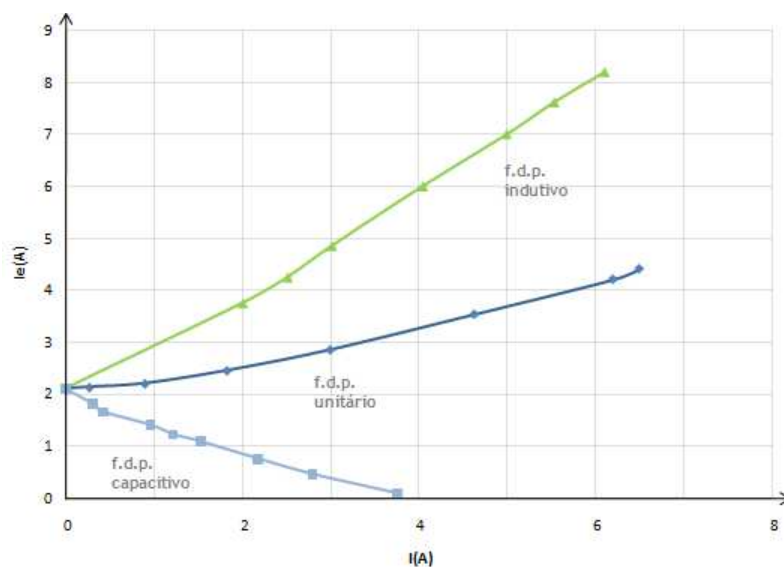


Figura 5.21 - Características de regulação da máquina síncrona.

Inicialmente, parte-se de um valor de corrente de excitação I_{eo} de tal modo que se obtém a tensão nominal em vazio.

A análise à característica de regulação $I_e = g(I)$ (figura 5.21) permite-nos concluir que para cargas resistivas e indutivas requerem-se excitações cada vez maiores à medida que aumenta a carga. Para cargas capacitivas, ocorre o fenómeno contrário, devido ao efeito desmagnetizante da f.m.m do induzido.

5.3.2 - Funcionamento em paralelo com a rede

No funcionamento do gerador síncrono em paralelo com a rede, foram efectuados três ensaios. Os dois primeiros tiveram como finalidade o estudo da regulação de potência activa P e também da potência reactiva Q . Veremos mais adiante a possibilidade de controlo destas duas variáveis, actuando na máquina primária e no valor da corrente de excitação, respectivamente. Por fim, o terceiro ensaio teve como objectivo a determinação das curvas em V , que dizem respeito a curvas de regulação da potência reactiva, mantendo a potência activa num valor pré-determinado.

A manobra de ligação do paralelo da máquina síncrona à rede eléctrica teve em conta os seguintes requisitos:

- Sequências de fases iguais à da rede;
- Tensão gerada pelo gerador síncrono igual à tensão da rede (400 V);
- Frequência gerada próxima superior à da rede

As condições de ligação da máquina síncrona à rede são realizadas na prática mediante um sincronoscópio, que no caso mais simples, é constituído por um conjunto de 3 lâmpadas que, conjuntamente com a medida de tensões no gerador e na rede, indicam as condições para efectuar o paralelo do gerador à rede.

Efectuado o paralelo à rede, o valor eficaz da tensão e frequência são fixas pela rede eléctrica. A figura 5.22 ilustra o esquema de montagem utilizado no decorrer dos ensaios com o gerador a funcionar em paralelo com a rede.

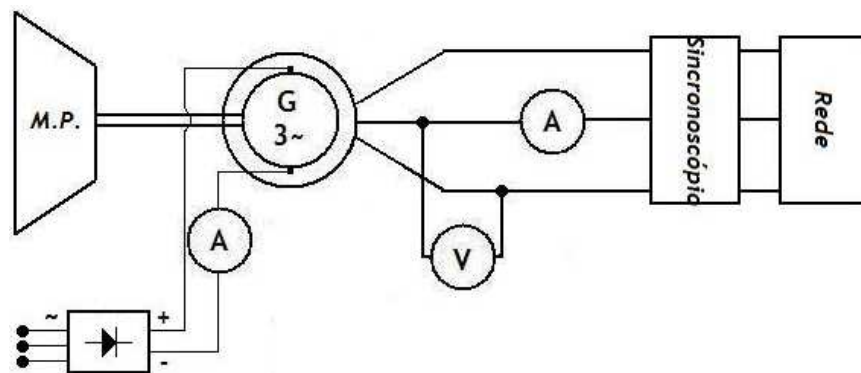


Figura 5.22 - Esquema de montagem: ensaio em paralelo com a rede.

5.3.2.1 - Regulação de P

O comportamento de um gerador síncrono funcionando isolado da rede em que a carga está bem especificada e quando conectado numa rede com potência muito superior à sua é bem diferente.

Sabemos da máquina síncrona que, nestas circunstâncias, esta dispõe de dois mecanismos de controlo:

- Sistema de regulação de velocidade do motor primário,
- Regulação de produção de Q controlada pela corrente de excitação.

Sendo a frequência e a tensão impostas pelas rede ao gerador síncrono quando interligados, estes dois mecanismos de controlo terão um efeito sobre a máquina síncrona diferente daqueles observados quando se estudou o funcionamento isolado da máquina síncrona.

Num cenário em que a variação de energia activa exigida pela rede é uma realidade, é preciso ajustar-se continuamente a produção ao consumo. Na prática, a potência activa gerada pela máquina síncrona (gerador) é realizada à custa do aumento da potência mecânica transmitida ao seu veio pelo controlo da admissão da turbina - regulação primária.

O funcionamento do regulador de velocidade pode ser adaptado ao nosso estudo tendo em conta se considerarmos a máquina primária, o motor de indução. Desta forma, o controlo que temos sobre este pelo ajuste no inversor de frequência, permite-nos regular a potência mecânica transmitida à máquina síncrona.

O controlo de frequência sobre o motor de indução permite, como referido anteriormente, controlar a velocidade síncrona do motor de indução. Esta relação directa pode ser explicada pela equação 5.14.

$$n_s = \frac{f}{p} 60 \quad (5.14)$$

O aumento da frequência provocará um aumento da velocidade de sincronismo da máquina assíncrona e estando o rotor desta a girar a uma velocidade n inferior a esta (a velocidade de rotação do rotor é imposta pela velocidade de rotação do gerador síncrono que roda à velocidade de sincronismo e que é imposta pela frequência da rede), a máquina assíncrona opera com deslizamentos positivos, deslizamento que é dado pela expressão 5.15.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (5.15)$$

Desta forma, fazendo crescer a frequência de alimentação da máquina assíncrona, a sua velocidade síncrona crescerá e consequentemente o seu deslizamento.

A característica binário vs velocidade da máquina assíncrona (figura 5.23) permite-nos concluir que o aumento do deslizamento, aumentará o binário mecânico desenvolvido pela máquina e, desse modo, a potência mecânica a ele associada.

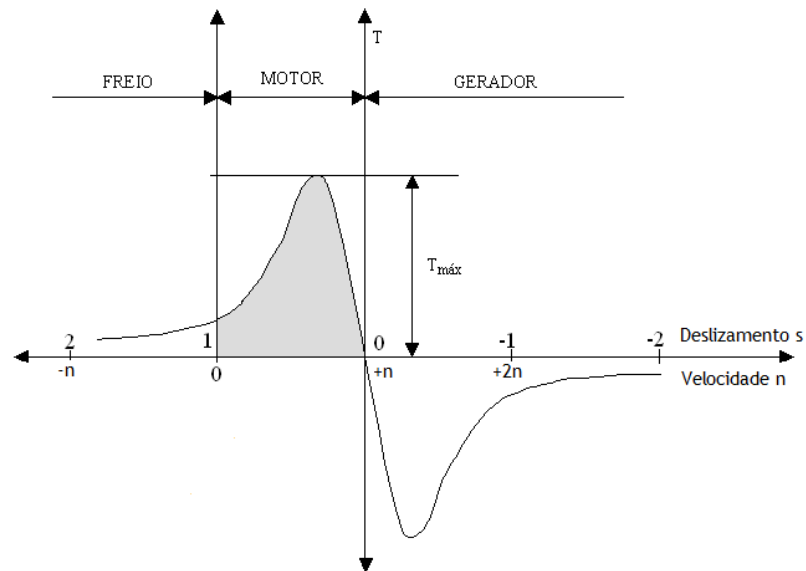


Figura 5.23 - Característica Binário - Velocidade da máquina assíncrona.

Tal como tínhamos referido, o aumento da potência mecânica provocará um aumento da potência eléctrica gerada pelo gerador síncrono. Aliás, a menos das perdas no gerador, toda a potência que lhe é fornecida pela máquina primária é transformada em potência (activa) eléctrica que este transfere para a rede eléctrica. A figura 5.24 permite ilustrar o comportamento da potência activa gerada pelo gerador síncrono em função da frequência imposta à máquina primária, isto é, ao motor assíncrono, conforme obtido experimentalmente.

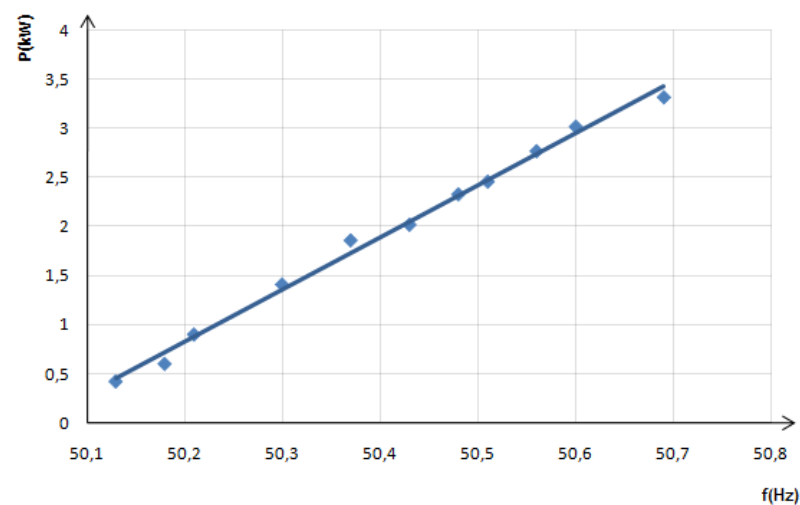


Figura 5.24 - Potência activa gerada em função da frequência de alimentação da máquina primária.

5.3.2.2 - Regulação de Q

A determinação das curvas em V que é abordada mais adiante permite-nos também determinar uma relação entre o factor de potência $\cos\varphi$ e a regulação da corrente de excitação I_e , podendo ser construída a curva $\cos\varphi = g(I_e)$.

Sendo o factor de potência dado pela expressão 5.16, e se a potência activa se mantiver constante, é óbvio que a variação do factor de potência resulta da variação da potência reactiva.

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (5.16)$$

A figura 5.25 ilustra um conjunto de curvas, cada uma correspondente a uma potência activa constante. É possível constatar a evolução de factores de potência capacitivos para factores de potência indutivos, variando-se na corrente de excitação.

Um caso interessante diz respeito ao ponto em que ocorre o factor de potência unitário, correspondente à energia reactiva mínima, ou nula ($Q = 0$), e uma determinada potência activa gerada.

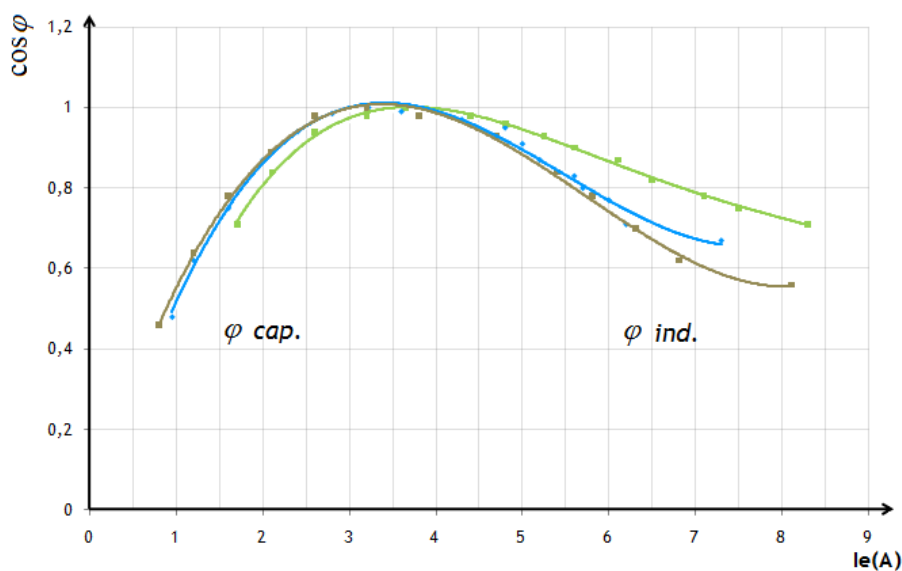


Figura 5.25 - Curvas f.d.p.=g(I_e).

5.3.2.3 - Curvas em V

O controlo da corrente de excitação na máquina síncrona provoca uma alteração da potência reactiva que esta pode entregar, embora não afecte significativamente a potência activa que esta absorve ou entrega. As curvas em V são obtidas experimentalmente, para diversos valores de potência P mantidas constantes, variando a corrente de excitação. Desta forma, é possível verificar-se que aumentando ou diminuindo o valor da corrente de excitação I_e , é possível controlar a corrente I entregue pela gerador à rede e desta forma, a potência reactiva a esta, afectando, como seria de esperar o factor de potência.

As curvas apresentadas na figura 5.26 dizem respeito aos valores de potência 15, 500, 1500, 2500, 2800 e 3500 kW. O valor mínimo obtido para a corrente I para os diversos valores de potência P , é representado pela curva MN, e que representa a curva de regulação para um factor de potência unitário.

Um dos casos mais interessantes, diz respeito ao caso em que a potência activa transitada entre gerador síncrono e rede é nula. Tal não significa contudo que o mesmo suceda quanto à potência reactiva, a qual pode ser positiva ou negativa (ou nula). Este é um modo de funcionamento possível para uma máquina síncrona, que então recebe a designação de compensador síncrono.

Este é um poderoso meio de regulação de tensão no barramento de interligação, que pode ser implementado usando os geradores de uma central, os quais variam de forma desejada o trânsito de potência reactiva com a rede.

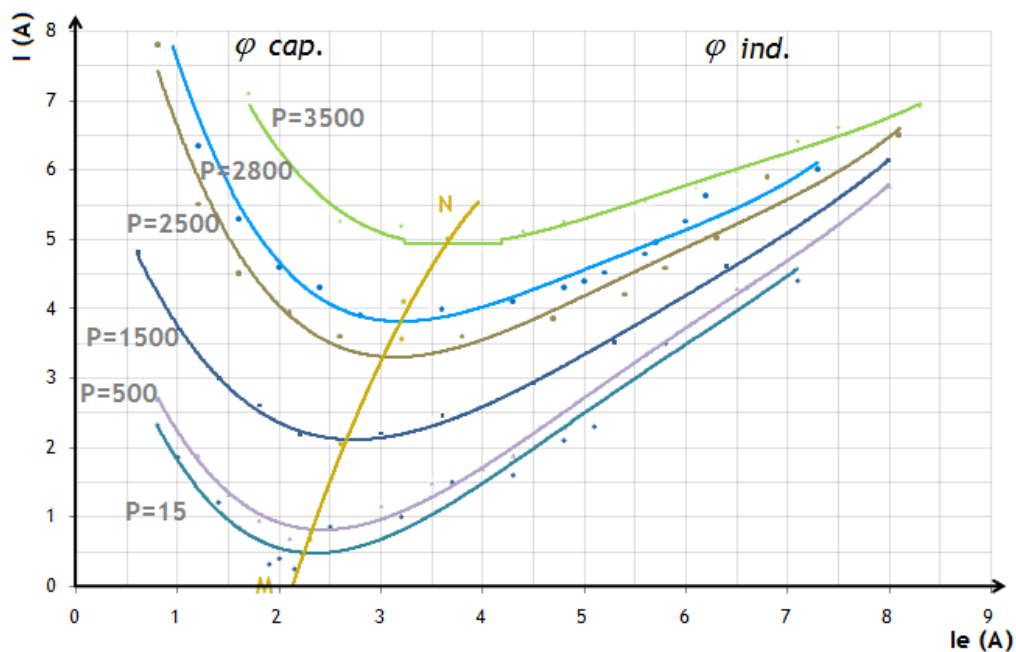


Figura 5.26 - Curvas em V.

5.4 - Diagrama de limites de funcionamento da máquina síncrona

O diagrama de limites de funcionamento da máquina síncrona é um traçado gráfico que representa os valores limites de potência activa e reactiva que esta pode desenvolver funcionando como gerador (ou motor), tendo em consideração as suas limitações técnicas, tais como, a sua corrente nominal, garantindo-se um funcionamento permanente estável.

A construção do diagrama de limites baseia-se no diagrama fasorial da máquina síncrona no qual, se se traçarem circunferências com origem no ponto C e com raio igual a $E_o = C^{te}$ correspondente a uma corrente de excitação, se obterão lugares geométricos para diferentes correntes de excitação. Por outro lado, o lugar geométrico de $X_s I = C^{te}$ que corresponde à corrente do induzido $I = C^{te}$, corresponderá a circunferências com centro em O e raio com valor igual à corrente do induzido em questão.

Apesar dos parâmetros da máquina terem sido determinados, tendo em conta o modelo de Blondel, o diagrama de limites é aqui determinado pela via simplificada, considerando o modelo de Behn Eschenburg que usa uma reactância única X_s .

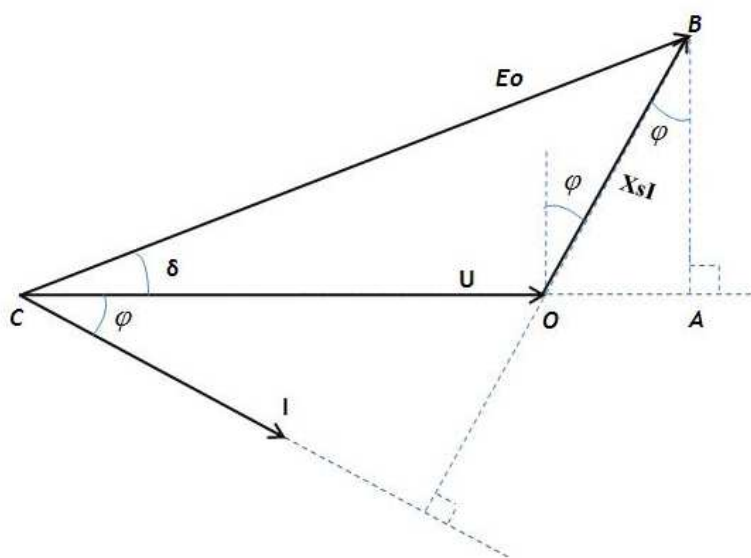


Figura 5.27 - Diagrama fasorial da máquina síncrona pelo método de Behn Eschenburg.

Por outro lado, e admitindo a resistência do induzido desprezável, bem como a reactância síncrona constante, é possível representar-se numa escala diferente (para representação em papel), o diagrama de limites associado ao funcionamento da máquina síncrona enquanto gerador.

A figura 5.28 representa o diagrama de limites, desenhado numa escala de potências. A construção associado a este, bem como a definição de escalas para a sua elaboração encontra-se no anexo C.

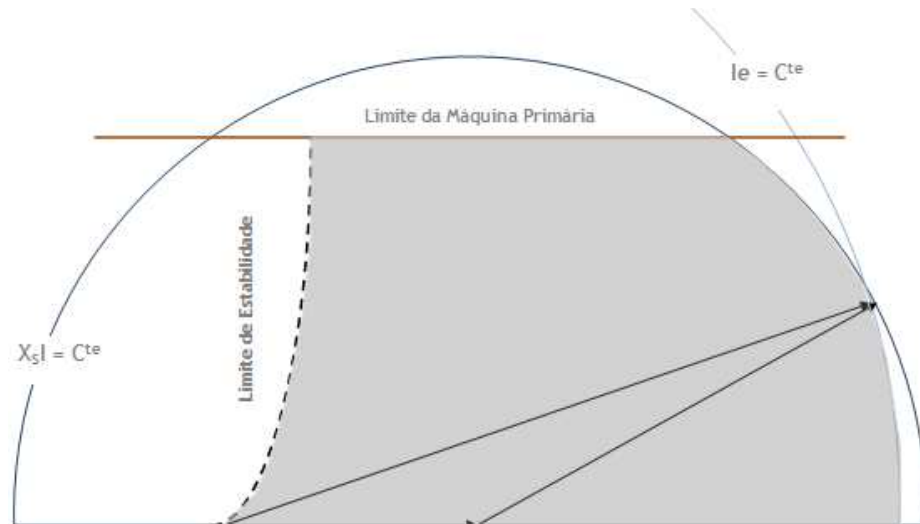


Figura 5.28 - Diagrama de limites de funcionamento.

A simples inspecção visual sobre o diagrama de limites obtido para a máquina síncrona permite-nos demonstrar qual a gama de variação admissível para várias grandezas eléctricas. Desta forma, as limitações técnicas impostas permitem-nos delimitar uma área de funcionamento estável para a máquina síncrona enquanto gerador, representada a cinzento (ver figura 5.28).

A área de funcionamento ou, dito de outra forma, os limites de funcionamento da máquina em regime permanente, vêm impostas pelas linhas ou curvas que dizem respeito a:

- Limite da potência máxima da máquina primária;
- Limite da potência aparente máxima da máquina síncrona que limita a corrente de circulação pelo induzido (corrente nominal da máquina);
- Limite imposto pela corrente máxima de excitação;
- Limite imposto pelo ângulo de carga máximo para que se cumprem as condições de estabilidade da máquina síncrona

Tal representação permite-nos concluir que, se por um lado a corrente nominal no induzido permitisse uma área de funcionamento maior, tal não é possível devido às limitações impostas pelas correntes de excitação que seriam necessárias para se desenvolver uma força electromotriz associada a essa corrente que circula no induzido.

5.5 - Síntese e Conclusões

O presente capítulo descreve pormenorizadamente o comportamento do gerador síncrono convencional, quando este funciona como gerador isolado e ligado à rede, em regime permanente. Por outro lado, determinaram-se os parâmetros da máquina síncrona, tanto em regime permanente como em regime transitório.

Em sequência do estudo experimental realizado, verifica-se que a tensão de saída do gerador depende do tipo de carga que este alimenta, apresentando comportamentos diferentes. Por outro lado, a regulação da tensão num valor constante é realizado à custa da regulação da corrente de excitação da máquina.

No funcionamento em paralelo com a rede, foram avaliados os efeitos que os sistemas de regulação que a máquina síncrona possui tinham sobre esta. A recordar:

- Sistema de regulação de velocidade do motor primário,
- Regulação de produção de Q controlada pela corrente de excitação.

A actuação nestes sistemas, realizada de forma independente, permitiu-nos associar a cada um o controlo de potência activa e reactiva, respectivamente.

Se por um lado, a regulação de velocidade da máquina primária está relacionada com o controlo de potência activa fornecida pelo gerador síncrono, o controlo da corrente de excitação está associado à regulação de produção de potência reactiva. Esta capacidade de controlo de forma independente torna a exploração da máquina síncrona interessante, podendo ajustar-se pelos adequados meios de regulação, à potência (activa ou reactiva) desejada.

As curvas em V ilustram tal situação, em que a potência reactiva é regulada, enquanto que a potência activa é mantida constante, num valor desejado.

Capítulo 6

Síntese/Conclusões e Perspectivas Futuras

6.1 - Conclusões

O presente trabalho foi dedicado ao estudo dos aspectos ligados aos aproveitamentos de energias renováveis, com destaque para as que se encontram em maior nível de crescimento e aposta actual. Já num segundo momento, foram analisadas as tecnologias associadas aos geradores eléctricos empregues bem como foi realizado o estudo experimental do gerador síncrono convencional como possível solução.

A caracterização realizada inicialmente do mercado actual (nacional e internacional) das energias renováveis permitiu destacar as boas perspectivas de desenvolvimento para este sector, acreditando-se que, num cenário a curto prazo, estas venham a contribuir com uma parcela significativa para o mix energético mundial. No entanto, se por um lado algumas tecnologias se encontram em claro amadurecimento tecnológico com soluções bem definidas, outras encontram-se ainda em fase de experimentação e ainda com incertezas quanto às melhores opções tecnológicas. Apesar disso, perspectiva-se que estas últimas poderão também dar um contributo essencial na diversificação das fontes de energias renováveis.

A variabilidade da fonte primária, característico das energias renováveis, obrigou aos fabricantes de geradores eléctricos a conceber sistemas de conversão eficientes que se adaptassem às variações, de forma a permitir aumentar as potencialidades na extracção de energia eléctrica. Deste modo, o contributo que a electrónica de potência veio permitir é notável, onde estratégias de controlo pré-definidas permitem contribuir para uma maior flexibilidade. Esta solução é amplamente utilizada no gerador de indução duplamente alimentado, bem como nas soluções baseadas na máquina síncrona.

Podemos afirmar que os geradores que operam a velocidade fixa (gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo) estão gradualmente a ser substituídos por tecnologia que permite a optimização energética através do funcionamento com velocidade variável (gerador de indução duplamente alimentado, gerador síncrono (convencional e de ímanes permanentes) acoplados a conversores de frequência).

As características de controlo que estas três últimas apresentam tornam-nas nas soluções actualmente preferidas, apesar do gerador síncrono de ímanes permanentes não ter ainda uma aplicabilidade tão expressiva em aproveitamentos de maior potência.

Por outro lado, a vantagem associada à dispensa de caixa de velocidades nos geradores síncronos contribui para o aumento da fiabilidade do grupo turbina - gerador, contribuindo como um argumento a favor para a sua utilização.

A actividade experimental desenvolvida neste trabalho permitiu caracterizar o funcionamento da máquina síncrona convencional enquanto gerador eléctrico, analisando e confrontando os resultados experimentais obtidos com os teoricamente esperados. Desta forma, o estudo realizado em regime permanente permitiu obter curvas características de funcionamento do gerador síncrono enquanto gerador em regime isolado e em paralelo com a rede.

No funcionamento como gerador isolado, foi possível avaliar o comportamento da tensão perante diferentes regimes de carga. Este facto permitiu-nos concluir que, para cargas resistivas e indutivas, a tensão decresce com o aumento da carga. Se a carga for capacitiva, assiste-se a uma subida de tensão. A regulação de tensão num valor desejado era realizada à custa da regulação da corrente de excitação, onde maiores correntes de excitação eram impostas no caso das cargas resistivas e indutivas, para assegurar a tensão no valor constante.

No funcionamento como gerador em paralelo com a rede, avaliou-se a regulação da potência activa e potência reactiva. Estando a tensão e frequência impostas pela rede, a possibilidade de regulação foi efectuado pelos dois mecanismos de regulação existentes.

- Sistema de regulação de velocidade do motor primário,
- Regulação de produção de Q controlada pela corrente de excitação.

Os efeitos que estes dois sistemas possuem ao nível do gerador síncrono foram analisados. De forma resumida, podemos afirmar que o controlo da velocidade da máquina primária influencia a potência activa que o gerador entrega. Por outro lado, o controlo da corrente de excitação permite controlar a potência reactiva. Este foi o ponto de partida para a elaboração das curvas em V , onde, para uma dada potência activa mantida constante, a variação da corrente de excitação implicava uma variação no trânsito de potência reactiva entre gerador eléctrico e rede.

Desta forma, a possibilidade de regulação destes dois mecanismos de controlo, possibilitam de forma independente a regulação da potência activa e reactiva do gerador síncrono.

6.2 - Perspectivas futuras

O estudo realizado mostrou ainda algumas oportunidades de continuação e linhas de orientação para seu desenvolvimento, as quais se destacam:

- Extensão do trabalho experimental realizado visando a obtenção de características de funcionamento em regime dinâmico da máquina síncrona, como gerador ligado à rede, nomeando e analisando a sua capacidade de prestar os serviços de rede hoje exigidos.

- Estudo comparativo entre as aptidões e características de funcionamento dos geradores síncrono e assíncrono, ligados à rede.
- Avaliação das características construtivas e de funcionamento da máquina síncrona de ímanes permanentes, como vista à clarificação do seu potencial e das suas vantagens no contexto de uso em aproveitamentos de energias renováveis com grande variabilidade na fonte primária.

Referências e Bibliografia

- [1] EDP - Energias de Portugal, “Guia prático de eficiência energética”, Disponível em http://www.cgd.pt/blog/pdf/guia_edp.pdf, último acesso em 03/01/09.
- [2] WEG: Disponível em www.weg.net/pt, acesso em Janeiro de 2009.
- [3] Ministério da Economia e da Inovação, “Energias Renováveis em Portugal”, Disponível em <http://www.min-economia.pt/innerPage.aspx?idCat=18&idMasterCat=15&idLang=1>, 2007.
- [4] EDF - Electricité de France, “Worldwide electricity production from renewable”, Disponível em <http://www.energies-renouvelables.org/observer/html/inventaire/Eng/chapitre3.asp>, 2007.
- [5] DGGE - Direcção Geral de Energia e Geologia; Renováveis, Estatísticas rápidas; nº 41; Disponível em <http://www.dgge.pt/aaaDefault.aspx>, 2008.
- [6] Castro, R., “Introdução à Energia Eólica”, Publicação Pedagógica, https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/106889/1/eolica_ed3.pdf, IST, Lisboa, 2007.
- [7] Castro, R., “Introdução à Energia Eólica”, Publicação Pedagógica, <http://www.troquedeenergia.com/Produtos/LogosDocumentos/IntroducaoAEnergiaEolica.pdf>, IST Lisboa, 2007.
- [8] Silva, José Carlos Moreira da; “Geradores Eléctricos para aproveitamentos de Energias Renováveis”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.
- [9] EWEA - The European Wind Energy Association, “News Release”, Disponível em www.ewea.org, 2008.
- [10] REN - Redes Energéticas Nacionais; “A Energia Eólica em Portugal”; <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/publicacoes/EnergiaEolica/A%20ENERGIA%20E%20C%20LICA%20EM%20PORTUGAL%201%C2%BA%20Semestre%202008%20-%202008-08.PDF>; 2008.
- [11] Danish Wind Industry Association; <http://www.windpower.dk/>, 2008.

[12] EWEA -The European Wind Energy Association; “Pure Power, Wind Energy Scenarios up to 2030”; Disponível em http://www.ewec2008.info/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/reports/purepower.pdf ; Março de 2008.

[13] REN - Redes Energéticas Nacionais; “Potencial Hidroelétrico Nacional, Importância sócio-económica e ambiental do seu desenvolvimento”, Disponível em <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/publicacoes/PublicacoesGerais/Potencial%20Hidroel%C3%A9ctrico%20Nacional.pdf> ; 2006.

[14] Canhoto,P.; Marques, J.M; “Energia hidroeléctrica”, Disponível em http://www.parquepeter.org/index.php?q=system/files/hidroelectrica_PCanhoto%26JMMarques_PETER.pdf , IST, Lisboa, 2005.

[15] Ordem dos Engenheiros; “Portugal vai ter dez novas barragens”; Disponível em http://www.ordemengenheiros.pt/Portals/0/Ing-101/ing101_1plano_2.pdf , 2007.

[16] MEI - Ministério da Economia e da Inovação, “Energia e Alterações Climáticas”; Disponível em <http://www.min-economia.pt/innerPage.aspx?idCat=18&idMasterCat=15&idLang=1> ; 2006.

[17] Diário Económico; “Portugal tem 110 pequenas centrais hídricas”; Disponível em http://diarioeconomico.sapo.pt/edicion/diarioeconomico/edicion_impresa/empresas/pt/desarrollo/1090703.html ; último acesso em 15/11/08.

[18] IEA-OES; “Ocean Energy Opportunity, Present Status and Challenges”; Disponível em www.iea-oceans.org/ , 2008.

[19] Entec, “Research Report 2 - Tidal technologies overview”; Disponível em http://www.sd-commission.org.uk/publications/downloads/TidalPowerUK2-Tidal_technologies_overview.pdf , United Kingdom, 2007.

[20] Bento, Leandro G. C; Morais, Tiago A.N. S.; “Conversão de Energia das Ondas”; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; Porto, 2005.

[21] Cruz J.M.B.P; Sarmento, A.J.N.A; “Energia das Ondas - Introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais”, Outubro de 2004.

[22] Jornal “O Público”; “Portugal vai ser pioneiro a nível mundial no aproveitamento da energia das ondas”; Disponível em <http://ultimahora.publico.clx.pt/noticia.aspx?id=1343696&idCanal=13> , último acesso em 21/11/08.

[23] Instituto Hidrográfico, <http://www.hidrografico.pt/> , último acesso em 26/11/08.

- [24] BWEA - British Wind Energy Association, "Why Marine?" <http://www.bwea.com/pdf/marine/FINAL%20WHY%20MARINE.pdf>, último acesso em 03/02/09.
- [25] Gorlov, A.M; "Tidal Energy, Academic Press"; Disponível em <http://www.gcktechnology.com/GCK/Images/ms0032%20final.pdf> ,2001.
- [26] OECE - Ocean Energy Conversion in Europe, "Recent advancements and prospects", European Comission, Disponível em http://www.wave-energy.net/index_files/documents/CA-OEBROCHURE.pdf , 2006.
- [27] Nguyen, T., "Tidal Power: Alternative Source of Energy", COSMOS 2008 UCD Cluster - Physics of Electro-Optics and Nuclear Technology, 2008.
- [28] Bhuyan, G.S., "Harnessing the Power of the Oceans", 2008.
- [29] EUBIA - European Biomass Industry Association, "Biomass resources", Disponível em <http://www.eubia.org/115.0.html> , acesso em Novembro de 2008.
- [30] EDF - Electricité de France, "La Biomasse. Production d' électricité et de chaleur", disponível em www.edf.pt, acesso em Novembro 2008.
- [31] AEBIOM - European Biomass Association, "Bioenergy routes", disponível em http://www.aebiom.org/article.php3?id_article=62, acesso em Novembro 2008.
- [32] DGGE - Direcção de Geologia e Energia, "A Aposta nas Energias Renováveis", Seminário APREN, Novembro 2007.
- [33] Mateus,T., "O potencial energético floresta portuguesa: análise do potencial energético disponível para as centrais termoeléctricas a biomassa florestal lançadas a concurso", FEUP, 2006.
- [34] BES - Banco Espírito Santo, "Os Biocombustíveis", Junho de 2008.
- [35] Dias, S.M., et al., "Avaliação do Potencial de Produção e Utilização de CDR em Portugal Continental", IST, Lisboa, 2006.
- [36] Sucena Paiva, J.P., " *Redes de energia eléctrica : uma análise sistémica*", IST Press, ISBN 972-8469-34-9, 2005
- [37] Boldea, I., "The electric generators handbook, synchronous generators"; Boca Raton; Taylor&Francis, 2006.
- [38] Sorensen, P. and T. Lund;"Reactive Power Capability of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator",Wiley Interscience,2007.

[39] Chapman, S.J., *Electric machinery fundamentals*, 4th edition, 5^a edição, Mc Graw Hill, Boston, 2005.

[40] Almeida, R., “Contribuições para a Avaliação da Capacidade de Fornecimento de Serviços de Sistema por parte de Aerogeradores de Indução Duplamente Alimentados”, Tese de Doutoramento, FEUP, Porto, 2006.

[41] Rodrigues, L.; “Wave power conversion systems for electrical energy production”, Faculdade de Ciências e tecnologia, 2004.

[42] Poller, M.A., “Doubly-Fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms”, IEEE, Bologna PowerTech Conference, June 23-26, Italy, 2003.

[43] BTM, “International *Wind Energy Development World Market Update 2007*”, disponível em <http://www.btm.dk/world-index.htm> , Março de 2008.

[44] Lopes, J.A.P., R.G.de Almeida, and J.A.L. Barreiros ;”Improving Power System Dynamic Behavior Through Doubly Fed Induction Machines Controlled by Static Converter Using Fuzzy Control”, IEEE Transactions, November 2004.

[45] Hansen, A.D., T. Hartkopf, and G. Michalke ;”Control of a wind park with doubly fed induction generators in support of power system stability in case of grid faults”, IEEE,2006.

[46] Lopes2, J.A.P. and R.G.d. Almeida, “Primary Frequency Control Participation Provided by Doubly Fed Induction Wind Generators”; IEEE, 2005.

[47] Ferreira, A.,” *Problemática e perspectivas da utilização do gerador de ímanes permanentes na produção de energia eólica*”, Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000.

[48] Pestana, Luís; “Máquinas Eléctricas I - Máquinas síncronas”, Escola superior de tecnologia de Viseu.

[49] Mora, J.F., “Máquinas eléctricas”, 5^a edición, Mc Graw Hill, Madrid, 2003.

[50] Ackermann, Ti, “Wind Power in Power Systems”, John Wiley & Sons, cop. 2005, ISBN 0-470-85508-8, 2005.

[51] Marques, J.T.F., “Metodologia de projecto de sistemas de produção de electricidade descentralizada baseados em Energia Eólica”, FEUP, Porto,2008.

[52] Sullivan, D.L.O. and A.W. Lewis; “Generator Selection for Offshore Oscillating Water Column Wave Energy Converters”, IEEE, 2008.

[53] Hansen, L.H., et al.;”Generators and Power Electronics Technology for Wind Turbines”; IECON'01 The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society; IEEE, 2001.

[54] Polinder, H., et al., “Conventional and TFPM Linear Generators for Direct-Drive Wave Energy Conversion”, IEEE Transactions, 2005.

[55] Benbouzid, M.E.H., et al., “Generators for Wind Energy Conversion Systems: State of the

- Art and Coming Attractions”; disponível em http://journal.esrgroups.org/jes/papers/3_1_3.pdf, J. Electrical Systems 3-1, p 26-38,2007;
- [56] Multon, B., Roboam, X., *et al*,”Aérogénérateurs électriques”,Techniques de l’Ingénieur, (s.d.).
- [57] Chen, Z., Hu Y., Blaabjerg, “Stability improvement of induction generator-based wind turbine systems”, IEEE, 2007
- [58] Poller,Sebastian A.M.,”Direct Drive Synchronous Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms”, (s.d.).
- [59] Mueller, M.A., H. Polinder, and N. Baker, “Current and Novel Electrical Generator Technology for Wave Energy Converters”, IEEE, 2007.
- [60] DTI,”Wave Energy: Linear versus Hydraulic Generators for Energy Conversion”, 2002.
- [61] Wavedragon, disponível em www.wavedragon.net, último acesso em 14/01/09.
- [62] Elghali, S.E.B., M.E.H. Benbouzid, and J.F. Charpentier,”Marine Tidal Current Electric Power Generation Technology: State of the Art and Current Status”, IEEE, 2007.
- [63] Clark, Pete, Klossner, R.,Kologe, L., “Tidal Power”, Cause Final Project, 2003.
- [64] Castro, R.M.G.,”Introdução à Energia Hídrica”, Publicação Pedagógica, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2002.
- [65] Guedes, Manuel Vaz, “O Alternador Síncrono Trifásico nos Aproveitamentos Hidroelétricos”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1994.
- [66] Pimentel, S., A. Lobo, Simpósio sobre Recursos Hídricos para pequenas centrais hidroelétricas, 1986.
- [67] Demetriades, G.M., “The use of induction generators for small-scale hydroelectric schemes in remote areas”, IEEE, 2000.
- [68] Monteiro, C., Mini-hídrica; disponível em http://paginas.fe.up.pt/~fmb/PTE2/Apontamentos%20PTE2/PTE2_minihidrica.pdf, 2007.
- [69] IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, “Energía de la biomassa”, Madrid, Enero de 2007.
- [70] Castro, R., “Introdução à Cogeração”, Publicação Pedagógica, IST, Lisboa, 2007.
- [71] Sriram, N. and M. Shahidehpour, “Renewable Biomass Energy, Illinois Institute of Technology”; IEEE, 2005.
- [72] Overend, R.P.,”Biomass Conversion Technologies; National Renewable Energy Laboratory”, 2001.
- [73] Brown, R.C., “Thermochemical Technologies for Biomass Energy”, IEEE Transactions, 2003.

[74] BCSD, “Manual de boas práticas de eficiência energética”, disponível em <http://www.bcsdportugal.org/files/496.pdf>, 2005.

[75] Group, Energy Nexus; “Technology Characterization: Microturbines”, Virginia, USA; March 2002

[76] Bona, Felipe Samuel de Bona; Filho, Ernesto R.; “As Microturbinas e a Geração Distribuída”, Artigo técnico, UNICAMP, Brasil, s.d.

Anexos

Anexo A - Sistema p.u

O sistema p.u. (por unidade) consiste na definição de valores de base para as grandezas (tensão, corrente, potência, etc.), seguida da substituição dos valores das variáveis (expressas no Sistema Internacional de Unidades) pelas suas relações com os valores de base pré-definidos.

Para sistemas trifásicos, toma-se vulgarmente como bases independentes, a potência de aparente total S_b e a tensão composta U_b . Por sua vez, a base de impedância é determinada tendo em conta a seguinte relação:

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} \quad (\text{A.1})$$

Por outro lado, a corrente de base é obtida pela seguinte expressão:

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}U_b} \quad (\text{A.2})$$

Definiram-se então os seguintes valores base:

$$S_b = S_n = 6,5kVA$$

$$U_b = U_n = 400V$$

$$I_b = \frac{6,5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} = 9,38A$$

$$Z_b = \frac{400^2}{6,5 \times 10^3} = 24,6\Omega$$

A corrente de excitação base é definida com sendo o valor de corrente de excitação registado para a tensão nominal da máquina ($U_n=400$ V). O valor definido para a corrente de excitação base é 2,0 A.

Anexo B - Resultados experimentais

Tabela B.1 - Ensaio em vazio para $n=1500$ rpm.

$n(\text{rpm})$	1500
$I_e(\text{A})$	$E_o(\text{V})$
0	29
0,2	69
0,25	102
0,4	150
0,6	202
0,8	253
1	290
1,5	363
2	400
2,5	425
3	441
3,5	454
4	468
4,5	478
5	483
5,5	492
6	496
6,5	501
7	509
7,5	510
8	515
8,5	520
9	525
9,5	525
10	530

Tabela B.2 - Ensaio em curto-circuito.

$I_e(\text{A})$	$I_{cc}(\text{A})$
0	0
1	2,6
1,5	3,9
2	5,2
2,5	6,6
3	8,1
3,5	9,3
4	10,7
4,5	12,2
5	13,5
5,5	14,5
6	16,1
6,5	17
7	18,6
7,5	19,5

Tabela B.3 - Determinação da impedância síncrona.

$I_e(A)$	$E_o/fase(V)$	$I_{cc}(A)$	$Z_s(\Omega)$
0	0	0	-
0,2	30	0,5	57
0,25	38	0,7	57
0,4	60	1,1	57
0,6	90	1,6	57
0,8	121	2,1	57
1	151	2,7	57
1,5	209,6	4,0	53
2	230,9	5,3	44
2,5	245,4	6,6	37
3	254,6	8,0	32
3,5	262,1	9,3	28
4	270,2	10,6	25
4,5	276,0	11,9	23
5	278,9	13,3	21
5,5	284,1	14,6	19
6	286,4	15,9	18
6,5	289,3	17,2	17
7	293,9	18,6	16
7,5	294,4	19,9	15
8	297,3	21,2	14
8,5	300,2	22,5	13
9	303,1	23,9	13
9,5	303,1	25,2	12
10	306,0	26,5	12

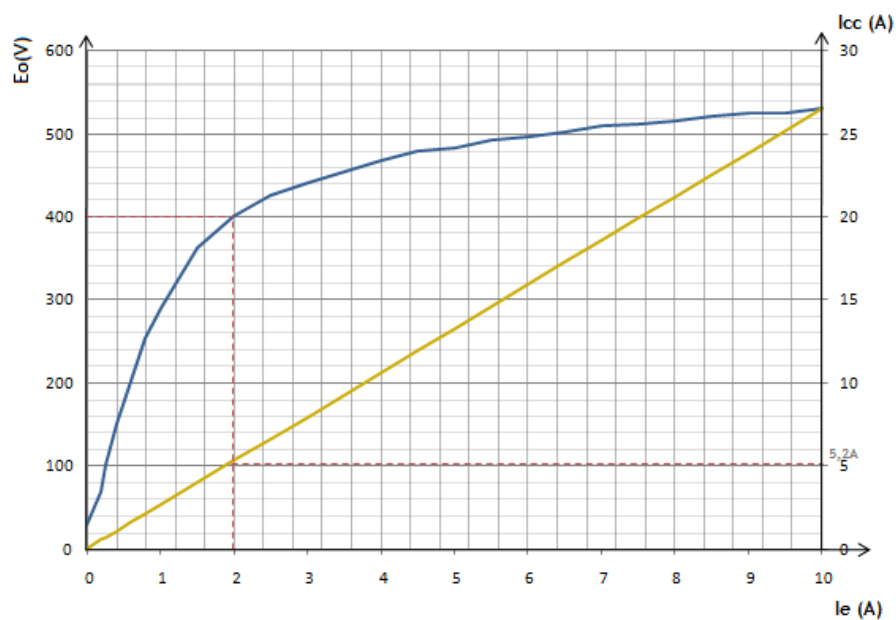


Figura B.1 - Determinação da reactância síncrona saturada.

Tabela B.4 - Ensaio em carga (sem regulação de tensão).

Resistivo					Indutivo				
U(V)	I(A)	P(W)	Q(Var)	$\cos \varphi$	U(V)	I(A)	P(W)	Q(Var)	$\cos \varphi$
400	0	70,5	1	1	400	0	0	0	0
397	0,9	212,5	7	1,00	335	1,6	53	313	0,17
386,7	1,8	404,5	20	1,00	330	1,8	52,2	329	0,16
372,2	2,6	561	36	1,00	321	1,9	50,7	352	0,14
354	3,3	676	49	1,00	314	2,0	50,5	356	0,14
335,3	3,9	757	68	1,00	298	2,3	49,8	394	0,13
313	4,4	791	76	1,00	275	2,6	42,6	412	0,10
290,1	4,8	794	79	1,00	256	2,9	42,3	424	0,10
267,5	5,0	770	76	1,00	220	3,4	41,7	423	0,10
240,6	5,3	729	76	0,99	200	3,6	40	416	0,10
212,5	5,4	645	73	0,99	167	3,9	41,27	377	0,11
173,8	5,6	555	66	0,99	145	4,2	39,8	352	0,11
144,4	5,6	464	60	0,99	120	4,5	35,3	310	0,11
124	5,7	401	53	0,99	110	4,6	33,2	292	0,11
108	5,7	349	49	0,99	90	4,8	30,2	248	0,12
95,7	5,7	310	45	0,99	70	5,0	23,9	202	0,12
85,8	5,7	279,6	38,1	0,99	58	5,1	20,9	171	0,12
78,1	5,7	254	37	0,99	45	5,3	16,7	136	0,12
72	5,7	236	34	0,99	35	5,4	18,45	107	0,17
68,3	5,7	223,5	31,8	0,99	30	5,5	17	93	0,18
65,8	5,7	215	31,2	0,99	27	5,5	16,4	83	0,19
63,6	5,7	207,5	30,5	0,99	Capacitivo				
57,8	5,7	189	27,3	0,99	U(V)	I(A)	P(W)	Q(Var)	$\cos \varphi$
55,6	5,7	181	26,5	0,99	400	0	31	-	-
53,6	5,7	175,5	26,7	0,99	413	0	1	87	0,01
51,8	5,7	169	24,5	0,99	426	1	2	195	0,01
49,9	5,7	164	23,8	0,99	434	1	2	283	0,01
48,4	5,7	158	23	0,99	459	2	34	481	0,07
46,8	5,7	153	22	0,99	481	3	39	740	0,05
45,4	5,7	148,5	22,4	0,99	503	4	39	1055	0,04
42,2	5,7	138	21	0,99	513	4	39	1218	0,03
38,9	5,7	127	19,6	0,99	521	5	40	1376	0,03
36,2	5,7	118,5	17,8	0,99	529	5	8	1570	0,01
33,3	5,6	107,5	14,3	0,99	547	6	7	1962	0,00
30,3	5,6	98	12,3	0,99	558	7	9	2334	0,00
27,6	5,6	89	11	0,99	568	8	12	2725	0,00
23,9	5,6	77	10	0,99	575	9	16	3016	0,01
					582	10	21	3391	0,01
					590	11	24	3807	0,01
					593	12	26	4010	0,01

Tabela B.5 - Ensaio em carga (com regulação de tensão).

Resistivo		Indutivo		Capacitivo	
I(A)	I _e (A)	I(A)	I _e (A)	I(A)	I _e (A)
0	2,1	0	2,1	0	2,1
0,3	2,1	2,0	3,8	0,3	1,8
0,9	2,2	2,5	4,3	0,4	1,7
1,8	2,5	3,0	4,9	1,0	1,4
3,0	2,9	4,1	6,0	1,2	1,2
4,6	3,5	5,0	7,0	1,5	1,1
6,2	4,2	5,5	7,6	2,2	0,8
6,5	4,4	6,1	8,2	2,8	0,5

Tabela B.6 - Método do Voltímetro-Amperímetro.

Fase UV			Fase UW			Fase VW		
U(V)	I(A)	R(Ω)	U(V)	I(A)	R(Ω)	U(V)	I(A)	R(Ω)
11,2	2,2	5,09	11,39	2,2	5,18	11,36	2,2	5,16
10,37	2	5,19	10,46	2	5,23	10,43	2	5,22
9,33	1,8	5,18	9,34	1,8	5,19	9,3	1,8	5,17
8,33	1,6	5,21	8,26	1,6	5,16	8,24	1,6	5,15
<R>		5,17	<R>		5,19	<R>		5,17

Tabela B.7 - Regulação de Potência activa.

I _{abs} (A)	f(Hz)	I _e (A)	P(kW)	Q(kVar)	f _{dp}	
5,6	50,1	2	0,4	-0,3	0,8	cap
5,7	50,2	2	0,6	-0,4	0,9	cap
5,8	50,2	2	0,9	-0,5	0,9	cap
6,2	50,3	2	1,4	-0,7	0,9	cap
6,6	50,4	2	1,9	-0,9	0,9	cap
6,7	50,4	2	2,0	-1,0	0,9	cap
7,1	50,5	2	2,3	-1,2	0,9	cap
7,3	50,5	2	2,5	-1,3	0,9	cap
7,7	50,6	2	2,8	-1,7	0,9	cap
8,0	50,6	2	3,0	-1,9	0,8	cap
8,5	50,7	2	3,3	-2,2	0,8	cap

Tabela B.8 - Curvas em V.

P(W)	le(A)	Q(Var)	I(A)	fdp		P(W)	le(A)	Q(Var)	I(A)	fdp	
35	0,8	-540	2,32	0,02	cap	2500	0,8	-4900	7,8	0,46	cap
18	1	-430	1,86	0,02	cap	2470	1,2	-2950	5,5	0,64	cap
0	1,4	-280	1,21	0,06	cap	2470	1,6	-1950	4,5	0,78	cap
13	1,6	-196	0,84	0,1	cap	2460	2,1	-1200	3,95	0,89	cap
15	1,9	-74	0,32	0,25	cap	2520	2,6	-500	3,6	0,98	cap
15	2	9	0,4	0,3	ind	2500	3,2	50	3,56	1	uni
25	2,15	26	0,25	0,89	ind	2490	3,8	500	3,6	0,98	ind
15	2,5	210	0,86	0,16	ind	2490	4,7	990	3,85	0,93	ind
15	3,2	270	1	0,05	ind	2500	5,4	1600	4,2	0,84	ind
20	3,7	390	1,5	0,05	ind	2500	5,8	2010	4,58	0,78	ind
25	4,3	490	1,6	0,03	ind	2490	6,3	2510	5,02	0,7	ind
20	4,8	600	2,1	0,025	ind	2500	6,8	3190	5,9	0,62	ind
25	5,1	690	2,3	0,019	ind	2500	8,1	3670	6,5	0,56	ind
15	5,8	950	3,5	0,014	ind	2780	0,95	-5000	8,2	0,48	cap
10	6,6	1060	4,3	0,008	ind	2790	1,2	-3500	6,35	0,62	cap
5	7,1	1180	4,4	0,003	ind	2800	1,6	-2500	5,3	0,75	cap
480	0,8	-1820	2,7	0,26	cap	2790	2	-1610	4,6	0,87	cap
510	1	-1460	2,25	0,33	cap	2810	2,4	-1000	4,3	0,94	cap
520	1,2	-1200	1,9	0,39	cap	2790	2,8	-510	3,9	0,985	cap
500	1,5	-800	1,33	0,5	cap	2800	3,22	90	4,1	1	uni
490	1,8	-455	0,96	0,71	cap	2810	3,6	250	4	0,99	ind
490	2,1	-150	0,7	0,95	cap	2800	4,3	630	4,11	0,97	ind
500	2,3	60	0,68	1	uni	2800	4,8	910	4,3	0,95	ind
520	2,5	228	0,88	0,9	ind	2790	5	1250	4,4	0,91	ind
500	3	658	1,17	0,61	ind	2770	5,2	1500	4,52	0,87	ind
500	3,5	930	1,5	0,49	ind	2800	5,6	1820	4,79	0,83	ind
490	4	1070	1,7	0,45	ind	2780	5,7	2030	4,95	0,8	ind
490	4,3	1380	1,9	0,3	ind	2810	6	2360	5,26	0,77	ind
461	4,8	1550	2,3	0,27	ind	2800	6,2	2720	5,63	0,71	ind
480	5,6	2440	3,35	0,1	ind	2830	7,3	3110	6,01	0,67	ind
480	6,5	3000	4,3	0,15	ind	3500	1,7	-3430	7,09	0,71	cap
487	8	4050	5,77	0,11	ind	3500	2,1	-2200	5,9	0,84	cap
1500	0,6	-3000	4,8	0,44	cap	3490	2,6	-1210	5,25	0,94	cap
1500	1	-2130	3,7	0,58	cap	3490	3,2	-640	5,18	0,98	cap
1520	1,4	-1500	3	0,71	cap	3500	3,65	60	5	1	uni
1480	1,8	-980	2,6	0,85	cap	3520	4,4	600	5,1	0,98	ind
1520	2,2	-381	2,18	0,97	cap	3490	4,8	960	5,24	0,96	ind
1500	2,6	61	2,05	1	uni	3510	5,25	1340	5,4	0,93	ind
1500	3	314	2,2	0,98	ind	3480	5,6	1580	5,54	0,9	ind
1560	3,6	835	2,45	0,81	ind	3490	6,1	1990	5,73	0,87	ind
1500	4,5	1500	2,92	0,69	ind	3480	6,5	2330	5,95	0,82	ind
1520	5,3	1980	3,51	0,6	ind	3470	7,1	2750	6,4	0,78	ind
1460	6,4	2680	4,6	0,48	ind	3480	7,5	3000	6,6	0,75	ind
1520	8	3600	6,13	0,4	ind	3490	8,3	3330	6,9	0,71	ind

Anexo C - Diagrama de limites de funcionamento

Neste anexo, inclui-se um exemplo ilustrativo sobre a construção do traçado gráfico que diz respeito ao diagrama de limites de funcionamento.

Se o diagrama da figura C.1 tivesse sido desenhado à escala, o segmento de recta $\overline{AO}$ deveria satisfazer a relação $U_s = 230V$ (tensão simples), pelo que numa escala diferente esta igualdade deve manter-se. Por outro lado, os segmentos $\overline{OB}$ e $\overline{AB}$ devem também estar representados à mesma escala, e, representarão a queda de tensão na reactância síncrona (admitida constante) e a f.e.m induzida à velocidade nominal pela excitação I_e .

Por outro lado, se multiplicarmos os comprimentos que dizem respeito a tensões pelo factor multiplicativo $3V_s / X_s$ que é um parâmetro constante, passaremos então a representar o nosso diagrama numa escala de potências.

Admitido isto, foram definidas as seguintes escalas:

Escala de tensões: $\mu = 46V / cm$,

Escala de potências: $\beta = 3 \frac{V_s}{X_s} \mu = 3 \times \frac{230}{44} \times 46 = 721,36VA / cm$.

Uma vez definidas as escalas, vem:

$$U_s = 230V = \frac{230}{46} = 5cm$$

$$|X_s I| = 44 \times 9,4 = 413,6V = \frac{413,6}{46} = 9cm$$

$$\underline{E_o} = \underline{U} + X_s \underline{I} = \underline{U} + X_s I (\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

Admitindo $\varphi = 30^\circ$

$$\underline{E_o} = 230 + 44 \times 9,4 \times (\cos 30^\circ + j \sin 30^\circ) = 588,19 + j206,8V = 12,79 + j4,5(cm)$$

Se quisermos representar o diagrama de limites, numa escala de potências, bastaria pois, multiplicar as tensões $\underline{U}$, $|X_s I|$ bem como a f.e.m pelo factor multiplicativo $3V_s / X_s$ e dividir pelo factor de escala de potências β . Os comprimentos tanto na escala de tensões como na escala de potências deverão dar iguais.

A figura C.1 ilustra o diagrama de limites de acordo com o exemplo admitido

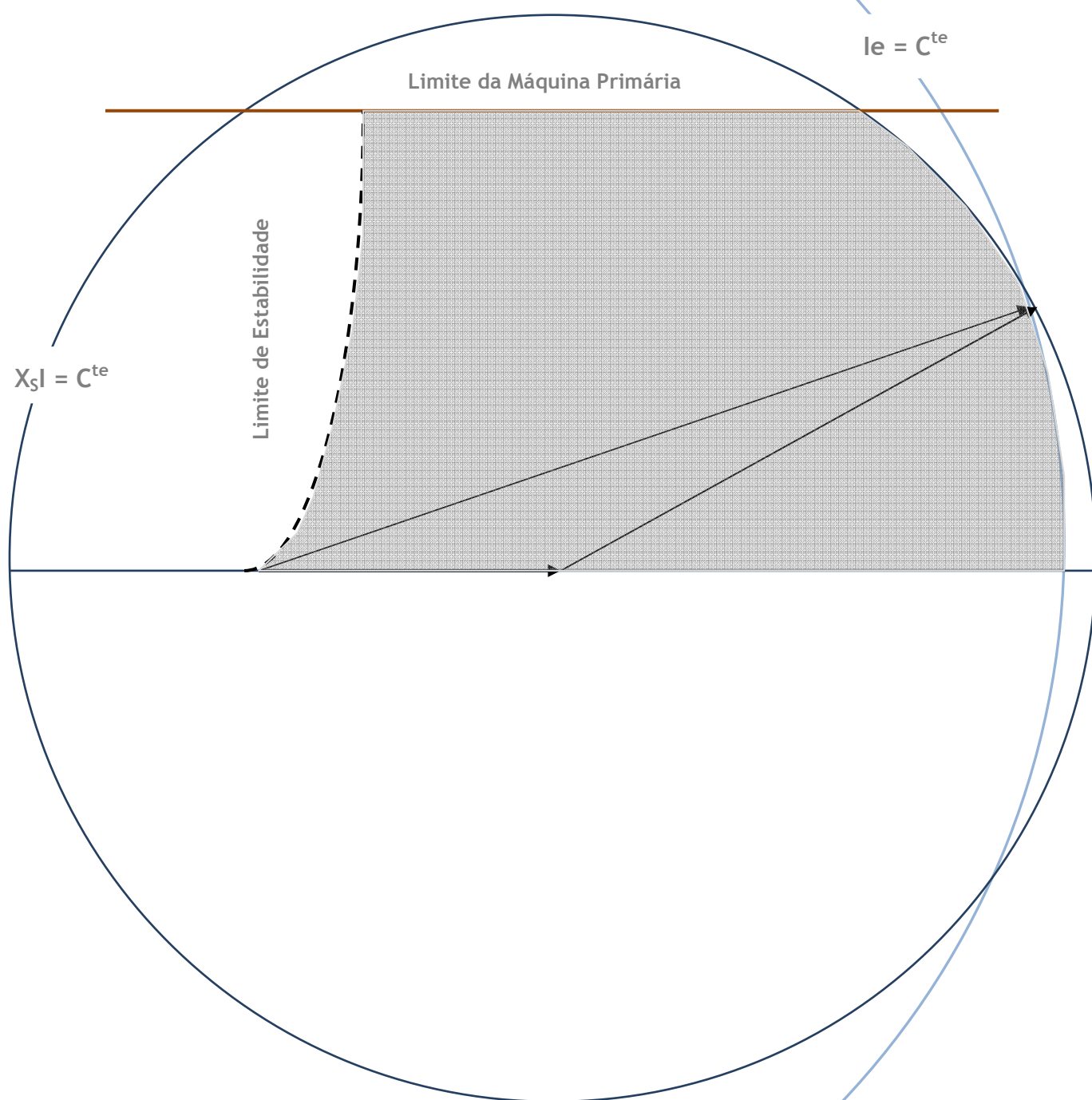


Figura C.1 - Diagrama de limites de funcionamento.

Anexo D - Transitórios

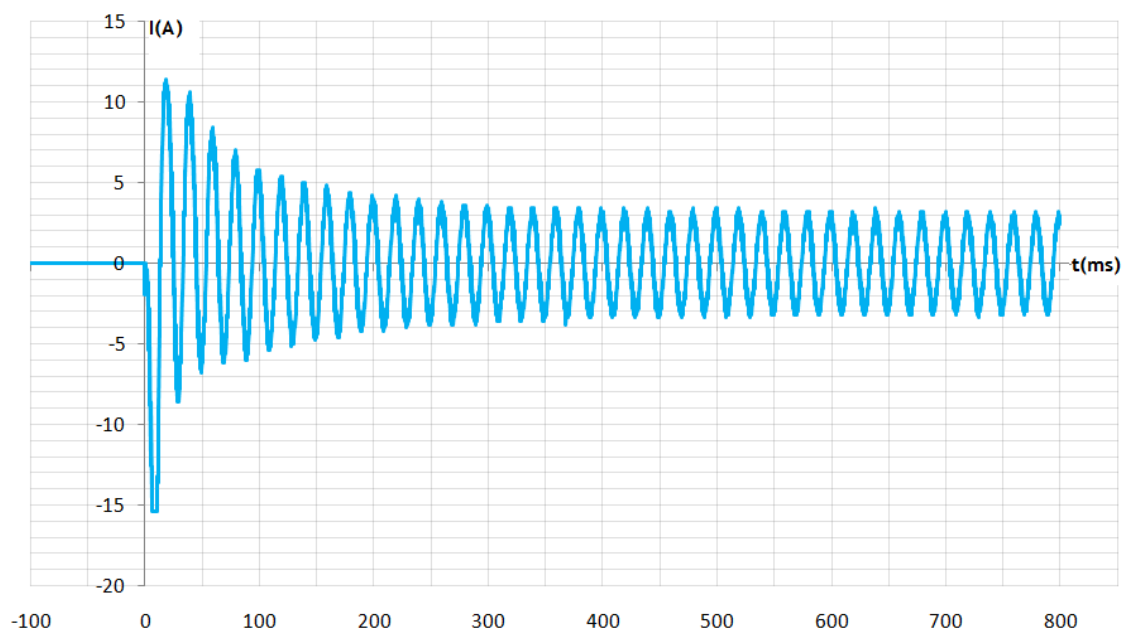


Figura D.1 - Corrente de curto-circuito, fase U.

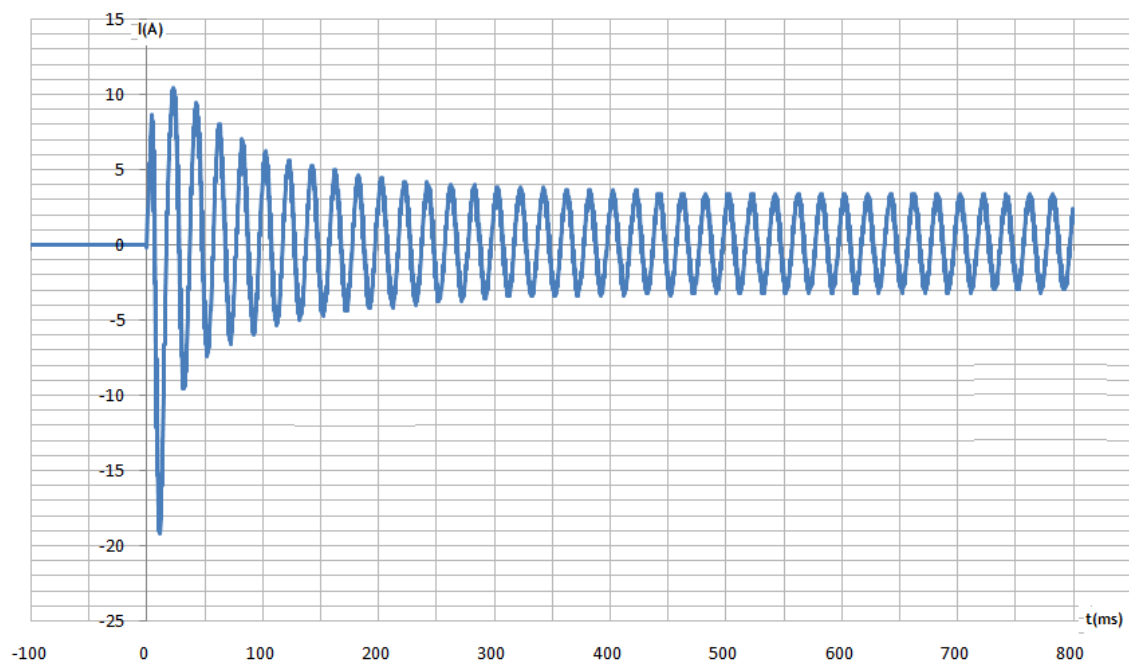


Figura D.2 - Corrente de curto-circuito, fase V.

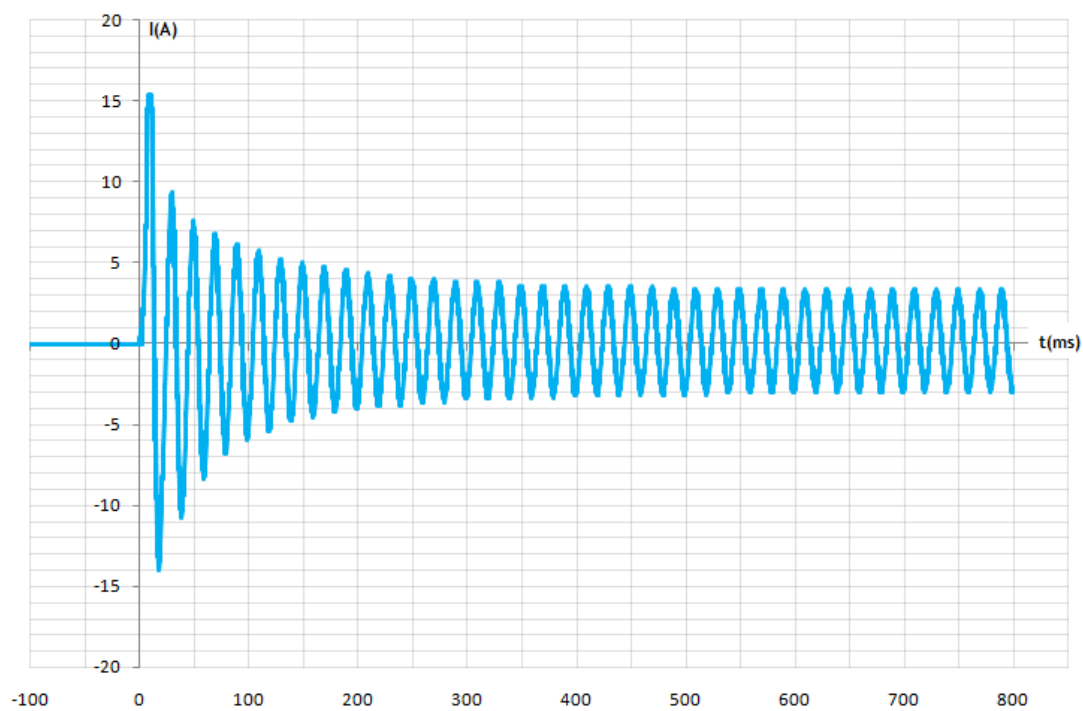


Figura D.3 - Corrente de curto-circuito, fase W.