



Fernando Manuel Gonçalves Pais

Licenciado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Caracterização da Qualidade da Energia entregue à rede por Centrais de Energia dos Oceanos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: João Francisco Alves Martins, Prof. Doutor,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Colaboração: Ana Estanqueiro, Doutora, Laboratório Nacional de Energia e Geologia

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Porto
Arguente: Prof. Doutor Mário Fernando da Silva Ventim Neves
Vogal: Prof. Doutor Luís Filipe Figueira de Brito Palma

“Copyright” - A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor

Agradecimentos

Quero agradecer todo o esforço e dedicação que todos aqueles que me acompanharam neste 'caminho' me deram, em especial à minha família. Um grande obrigado aos meus pais, por me manterem sempre este objectivo presente e por me fazerem acreditar. Aos meus amigos e colegas que colaboraram neste trabalho, em particular um grande obrigado ao colega João Lameira, por todo o apoio no dimensionamento da central e pela ajuda nas simulações, à Patrícia Caeiro pelo aconselhamento, e aos amigos mais próximos que, em várias fases da minha vida, me fizeram continuar.

Um agradecimento especial à Dr.^a Ana Estanqueiro, por me ter permitido 'entrar' no seu núcleo de trabalho no INETI e pelo aconselhamento e apoio durante a programação do modelo bem como ao Professor Leão Rodrigues pela atenção e sentido de responsabilidade que sempre me deu. Um agradecimento especial também ao Professor João Martins, por me ter aconselhado e acompanhado nesta fase final e por me ter feito acreditar que era possível encerrar este 'capítulo'.

Resumo

Pretende-se, com este trabalho, caracterizar a qualidade de energia entregue à rede por centrais de energia das ondas, nomeadamente do tipo Coluna de Água Oscilante. Tendo em consideração esse objectivo, é dimensionado um modelo de uma Central de Energia das Ondas, que permite aferir as condições de injeção na rede da energia produzida por este tipo de unidades.

Complementarmente é dimensionado o mesmo modelo com uma máquina de indução duplamente alimentada, com possibilidade de controlo, semelhante aos utilizados nos Aerogeradores Eólicos. Essa análise permite perceber o impacte deste tipo de controladores na qualidade da energia entregue à rede em Centrais do tipo Coluna de Água Oscilante.

Para o desenvolvimento deste modelo é utilizada a linguagem de programação Matlab.

Palavras-chave

Qualidade da energia, Energia das ondas, Controlo de Potência, Turbina de Wells, MIDA.

Abstract

The main objective of this project is to characterize the energy quality delivered to the network by wave power plants, in particular of the Oscillating Water column type. Taking into account this goal, it is a scaled model of a wave energy Center, which allows you to assess the conditions of network injection of energy produced by this type of units.

In addition is scaled the same model with a doubly fed induction machine, with the possibility of control, similar to those used in Wind Turbines. This analysis allows to realize the impact of this type of power quality controllers delivered to the Central network of oscillating water Column type.

For the development of this model is used the Matlab programming language.

Keywords

Energy Quality, Wave Energy, Power Control, Wells Turbine, DFIG.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	ix
Índice	xi
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xv
Lista de Siglas.....	xvii
Lista de Símbolos	xix
1. Introdução.....	1
1.1 Motivação e Objectivos	2
1.2 Contribuições Originais e Estrutura do Trabalho	2
2. Estado de Arte da Energia das Ondas	3
2.1 Enquadramento	3
2.2 Tecnologias de Conversão.....	5
2.2.1 Dispositivos Onshore.....	6
2.2.2 Dispositivos Nearshore.....	8
2.2.3 Dispositivos Offshore	9
3. Qualidade de Energia	13
3.1 Problemas de Qualidade de Energia Eléctrica.....	13
3.2 Fontes de Poluição Harmónica na Rede	15
3.3 Soluções para os Problemas de Qualidade de Energia Eléctrica.....	17
4. Abordagem Metodológica – Estudo da Tecnologia	19
4.1 Turbina	21
4.1.1 Turbina de Wells	21
4.1.2 Outros tipos de Turbinas	23
4.2 Gerador	25
4.2.1 Máquina assíncrona	26
4.2.2 Máquina de Indução Duplamente Alimentada	29
5. Aplicação do Modelo - Implementação da Central de Coluna de Água Oscilante.....	33
5.1 Turbina de Wells	33
5.2 Máquina de Indução Duplamente Alimentada	35
5.2.1 Regime Permanente	35
5.2.2 Regime Transitório	39
5.3 Conversor estático duplo	41
5.3.1 Integração do modelo à Rede Eléctrica	42
5.3.2 Controlo Vectorial	44
5.3.3 Modulação por largura de impulso (Pulso Width Modulation - PWM).....	45
5.4 Sistema de Controlo	46
5.4.1 Conversor do lado do Rotor (RSC)	46
5.4.2 Conversor do lado do Rede (GSC).....	51
5.4.3 Controlo de Potência Reactiva	53
5.4.4 Circuito de Tensão Contínua	54
6. Simulação do Modelo e Análise de Resultados	57
Resultados.....	57
Conclusões.....	67
Bibliografia.....	69
Anexos.....	75
A. Grandezas em p.u.	75

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Energia das Ondas	3
Figura 2.2 – Formação das Ondas no Mar	3
Figura 2.3 – Distribuição do fluxo energético médio mundial, em kW/m	4
Figura 2.4 - Distribuição do fluxo energético médio europeu, em kW/m	4
Figura 2.5 – Mapa do potencial energético português, média anual	5
Figura 2.6 – Comparação do mapa do potencial energético português, entre o Inverno (Winter) e o Verão (Summer)	5
Figura 2.7 – Esquema da Central de Coluna de Água Oscilante	6
Figura 2.8 – Perspectivas de uma Central de Coluna de Água Oscilante	7
Figura 2.9 – Antevisão artística do OSPREY	8
Figura 2.10 – Modelo do OSPREY com a inclusão do aerogerador eólico	8
Figura 2.11 – Esquema de funcionamento do dispositivo AWS	9
Figura 2.12 – Central Piloto em Nissum	10
Figura 2.13 – Bredning/Dinamarca	11
Figura 2.14 – Módulo de conversão de energia Pelamis	11
Figura 2.15 – Dispositivo Pelamis	12
Figura 2.16 – Módulo de conversão de energia do AquaBuoy	12
Figura 3.1 – Problemas de Qualidade de Energia Eléctrica	15
Figura 3.2 – Formas de onda da tensão e da corrente de entrada de um Rectificador monofásico com filtro capacitivo	16
Figura 3.3 – Harmónicos da corrente	16
Figura 4.1 – Corte lateral de uma Central CAO	20
Figura 4.2 – Esquema da Central de Coluna de Água Oscilante	21
Figura 4.3 – Turbina de Wells	21
Figura 4.4 – Rotor de uma Turbina de Wells	22
Figura 4.5 – Estator de uma Turbina de Wells e respectivas pás directrizes	22
Figura 4.6 – Turbina de Wells e Gerador na Central do Pico (Açores)	23
Figura 4.7 – Turbina de Agnelo David e Babisten	24
Figura 4.8 – Turbina de Filipenco	24
Figura 4.9 – Turbina contra-rotativa de McCormick	24
Figura 4.10 – Binário mecânico transmitido pela turbina ao gerador	25
Figura 4.11 – Binário mecânico transmitido pela turbina e respectiva velocidade de rotação	26
Figura 4.12 – Gerador de Indução	26
Figura 4.13 – Esquema Equivalente	27
Figura 4.14 – Corte lateral de uma Máquina de Indução	30
Figura 4.15 a) – Curvas características Binário – Velocidade da máquina de indução, para vários valores de resistência	31
Figura 4.15 b) – Característica do Binário – Velocidade da MIDA	31
Figura 5.1 – Curva $\Phi = f_w(\Psi)$, coeficiente adimensional de caudal em função do coeficiente adimensional de pressão para a turbina de Wells	35
Figura 5.2 – Curva $\Pi = f_p(\Psi)$, coeficiente adimensional de potência em função do coeficiente adimensional de pressão para a turbina de Wells	35
Figura 5.3 – Esquema equivalente da máquina de indução	36
Figura 5.4 – Trânsito de potência quando a máquina está a funcionar como gerador	38
Figura 5.5 – Conversor estático duplo	42
Figura 5.6 – Transformador com três enrolamentos	43
Figura 5.7 – Esquema do modelo da MIDA	44
Figura 5.8 – Controlo Vectorial	45
Figura 5.9 – Ponte Inversora	46
Figura 5.10 – Gerador de sinais PWM	46
Figura 5.11 – Modelo do RSC	49
Figura 5.12 – a) Medidor de corrente e b) Medidor de potência do RSC	50
Figura 5.13 – Modelo do GSC	52
Figura 5.14 – Medidor de corrente do GSC	52
Figura 5.15 – Controlador PI para controlo da Potência Reactiva pelo GSC	54
Figura 5.16 – Circuito de corrente contínua	54
Figura 6.1 – Resposta da parte real do Fluxo do Rotor ao degrau unitário sem controlo	57
Figura 6.2 – Resposta da parte real do Fluxo do Rotor ao degrau unitário com controlo	57

Figura 6.3 – Resposta da parte imaginária do Fluxo do Rotor ao degrau unitário sem controlo	58
Figura 6.4 – Resposta da parte imaginária do Fluxo do Rotor ao degrau unitário com controlo	58
Figura 6.5 – Resposta da Potência Activa no degrau unitário sem controlo	58
Figura 6.6 – Resposta da Potência Activa no degrau unitário com controlo	58
Figura 6.7 – Resposta da Potência Reactiva no degrau unitário sem controlo	59
Figura 6.8 – Resposta da Potência Reactiva no degrau unitário com controlo	59
Figura 6.9 – Potência Activa de entrada na rede com o degrau unitário sem controlo	59
Figura 6.10 – Potência Activa de entrada na rede com o degrau unitário com controlo	59
Figura 6.11 – Potência Reactiva de entrada na rede com o degrau unitário sem controlo	60
Figura 6.12 – Potência Reactiva de entrada na rede com o degrau unitário com controlo	60
Figura 6.13 – Resposta da Velocidade de Rotação do Veio ao degrau unitário com controlo	60
Figura 6.14 – Pressão de ensaio à entrada da Turbina de Wells	61
Figura 6.15 – Resposta da parte real do Fluxo do Rotor sem controlo	62
Figura 6.16 – Resposta da parte real do Fluxo do Rotor com controlo	62
Figura 6.17 – Resposta da parte imaginária do Fluxo do Rotor sem controlo	62
Figura 6.18 – Resposta da parte imaginária do Fluxo do Rotor com controlo	62
Figura 6.19 – Resposta da parte real da Corrente no Rotor sem controlo	63
Figura 6.20 – Resposta da parte real da Corrente no Rotor com controlo	63
Figura 6.21 – Resposta da parte imaginária da Corrente do Rotor sem controlo	63
Figura 6.22 – Resposta da parte imaginária da Corrente do Rotor com controlo	63
Figura 6.23 – Resposta da Potência Activa no Rotor sem controlo	64
Figura 6.24 – Resposta da Potência Activa no Rotor com controlo	64
Figura 6.25 – Resposta da Potência Reactiva no Rotor sem controlo	64
Figura 6.26 – Resposta da Potência Reactiva no Rotor com controlo	64
Figura 6.27 – Potência Activa de entrada na rede sem controlo	65
Figura 6.28 – Potência Activa de entrada na rede com controlo	65
Figura 6.29 – Potência Reactiva de entrada na rede sem controlo	65
Figura 6.30 – Potência Reactiva de entrada na rede comm controlo	65
Figura 6.31 – Resposta da Velocidade de Rotação do Veio sem controlo	66

Índice de Tabelas

Tabela 5.1 – Modos de funcionamento das Máquinas de Indução de Rotor em Gaiola de Esquilo e Duplamente Alimentadas	38
--	----

Lista de Siglas

CAO = Coluna de Água Oscilante
GSC = Grid Side Converter
GTO = Gate Turn Off
IGBT = Insulated Gate Bipolar Transistor
MCC = Máquina de Corrente Contínua
MIDA = Máquina de Indução Duplamente Alimentada
MPT = Maximum Point Tracking
PA = Potência Activa
PI = Proporcional Integral
PR = Potência Reactiva
p.u. = por unidade
PWM = Pulse Wide Modulation
ROTE = Referencial Orientado pela Tensão do Estator
RSC = Rotor Side Converter

Lista de Símbolos

R_s = Resistência de um enrolamento do estator (Ω)

R_r = Resistência equivalente de um enrolamento do rotor (Ω)

X_{ds} = Reactância de dispersão de um enrolamento do estator (Ω)

X_{dr} = Reactância de dispersão equivalente de um enrolamento do rotor (Ω)

X_m = Reactância de magnetização (Ω)

R_{Fe} = Resistência de perdas no núcleo magnético (Ω)

V_S = Tensão no estator (V)

r_S = Resistência estatórica (Ω)

X_{1S} = Reactância estatórica (Ω)

I_S = Corrente estatórica (A)

s = Escorregamento (rad/s)

V_R = Tensão no rotor (V)

r_R = Resistência rotórica (Ω)

X_{1R} = Reactância rotórica (Ω)

I_R = Corrente rotórica (A)

E = Força electromotriz (V)

X_m = Reactância de magnetização (Ω)

I_m = Corrente de magnetização (A)

ω_S = Velocidade estatórica (rad/s)

ω_R = Velocidade rotórica (rad/s)

P = Potência activa (W)

P_R = Potência activa no rotor (W)

P_S = Potência activa no estator (W)

Q = Potência reactiva (W)

Q_R = Potência reactiva no rotor (W)

Q_S = Potência reactiva no estator (W)

P_{ag} = Balanço de potência activa no rotor da máquina (W)

P_{mec} = Potência mecânica (W)

v_{sd} = Componente directa da tensão estatórica (V)

- v_{Si} = Parte imaginária da tensão no estator (V)
- v_{Sq} = Componente em quadratura da tensão estatórica (V)
- v_{Sr} = Parte real da tensão no estator (V)
- v_{Rd} = Componente directa da tensão rotórica (V)
- v_{Ri} = Parte imaginária da tensão no rotor (V)
- v_{Rq} = Componente em quadratura da tensão rotórica (V)
- v_{Rr} = Parte real da tensão no rotor (V)
- i_{Sr} = Parte real da corrente estatórica (A)
- i_{Si} = Parte imaginária da corrente estatórica (A)
- i_{Rr} = Parte real da corrente rotórica (A)
- i_{Ri} = Parte imaginária da corrente rotórica (A)
- λ_{Sr} = Parte real do fluxo estatórico (T)
- λ_{Si} = Parte imaginária do fluxo estatórico (T)
- λ_{Rr} = Parte real do fluxo rotórico (T)
- λ_{Ri} = Parte imaginária do fluxo rotórico (T)
- M = Indutância de magnetização (H)
- L_S = Indutância estatórica (H)
- L_R = Indutância rotórica (H)
- n_{pp} = Número de pares de polos
- H = Constante de inércia da máquina de indução
- Γ_{mec} = Binário mecânico (N.m)
- Γ_{em} = Binário electromagnético (N.m)
- X^Z = Vector referenciado ao eixo Z

1. Introdução

Quando no início da década de 70 surgiu a crise do petróleo, as energias renováveis apareciam como a alternativa possível e imediata e daí serem vistas e designadas como energias alternativas. Nessa altura, e atendendo às preocupações mundiais com o aumento do preço do barril de petróleo, o objectivo consistia apenas na substituição do petróleo e na diversificação das fontes de energia, de modo a que as soluções alternativas satisfizessem em condições favoráveis, as necessidades energéticas. Actualmente, esta situação tomou novas proporções visto diariamente se atingirem novos máximos históricos para o preço do crude, situação essa que faz encarar as energias renováveis não apenas como outra solução mas como a saída para uma eventual crise energética. O ritmo a que se verifica o consumo actual dos recursos energéticos fósseis e as perspectivas da sua evolução a curto e a médio prazo, são duas das razões que explicam este disparar de preços, e que colocam dois importantes problemas de toda a actualidade: o primeiro prende-se com questões de ordem ambiental, como consequência da transformação e do consumo da energia de natureza fóssil e o segundo resulta do facto dos recursos energéticos fósseis serem finitos, ou seja, esgotáveis.

Para um país como Portugal, que não dispõe de recursos energéticos fósseis, a importação dispendiosa do petróleo e a dependência de outros países para assegurar as suas necessidades energéticas, faz com que o aproveitamento das fontes de energia renováveis seja actualmente uma das prioridades da sua política energética nacional. Neste contexto, aparecem as fontes de energia renováveis, à sua escala e numa forma complementar às fontes de energia convencionais, sobretudo desde que Portugal se comprometeu com a União Europeia que até 2010 iria aumentar para 39% do consumo bruto nacional eléctrico a percentagem proveniente de fontes de energia renováveis. O total de potência renovável instalada atingiu 5974MW no final de Julho de 2005, mantendo-se até Julho, um forte ritmo de crescimento, de 10% ao ano. A incorporação de fontes de energias renováveis no consumo bruto de energia eléctrica, para efeitos de directiva, foi de 35% em 2004, sendo Portugal o terceiro país da União Europeia dos 15 com maior incorporação de energias renováveis.

A Energia Renovável é aquela que é obtida de fontes naturais capazes de se regenerarem, e, portanto, virtualmente inesgotáveis, como por exemplo:

- O Sol: energia solar;
- O vento: energia eólica;
- Os rios e correntes de água doce: energia hidráulica;
- A matéria orgânica: biomassa;
- O calor da Terra: energia geotérmica;
- Os mares e oceanos:
 - i) Através da ondulação marítima;
 - ii) Aproveitamento do desnível periódico devido às marés, e correntes marítimas;

- iii) Utilização da diferença de temperaturas existente entre a superfície e o fundo do mar.

1.1 Motivação e Objectivos

Este trabalho teve como objectivo a modelação de uma central de Energia das Ondas, nomeadamente do tipo Central de Coluna de Água Oscilante, em Matlab.

Tratando-se de uma tecnologia relativamente recente e com poucas unidades em funcionamento em todo o mundo, é importante pensar em formas de potencializar a central e otimizar a energia produzida. Dessa forma, para além de todos os restantes componentes da central, e apesar de inicialmente não estar previsto, considerou-se no modelo uma Máquina de Indução Duplamente Alimentada, que permite o controlo da energia injectada na rede.

1.2 Contribuições Originais e Estrutura do Trabalho

Uma vez que a Central de Coluna de Água Oscilante (CAO) é uma tecnologia conhecida e bastante estudada, existe bastante informação relativa aos seus componentes e modo de funcionamento. Apesar desse facto, considerou-se que se podia potenciar a produção e melhorar a qualidade da energia injectada na rede através da inclusão de uma máquina muito utilizada na tecnologia Eólica, a Máquina de Indução Duplamente Alimentada (MIDA). Visto que a forma de aproveitamento da energia proveniente da ondulação é conseguida através da variação da pressão e do fluxo de ar que atravessa a turbina, constatamos que existem semelhanças evidentes com a tecnologia Eólica, razão pela qual se pensou na implementação neste modelo da MIDA.

Sabendo-se que, todos os conteúdos falados são sobejamente conhecidos e estudados, verifica-se que a grande contribuição original deste trabalho está na articulação de todas estas partes num todo único, enquanto Central de Energia das Ondas. O dimensionamento desta central em Matlab, com uma Turbina de Wells e uma MIDA com controlo são algo de diferente, uma vez que todas as centrais CAO estudadas e construídas utilizam uma máquina assíncrona sem qualquer tipo de controlo.

2. Estado de Arte da Energia das Ondas

2.1 Enquadramento

Este capítulo pretende fazer um enquadramento e um ponto de situação das várias formas de aproveitamento da energia das ondas e das tecnologias de conversão existentes.

Embora as primeiras patentes de sistemas para aproveitamento da energia das ondas tenham aparecido no final do século XVIII, apenas a meados do século XX, no Japão, apareceu a primeira aplicação industrial com a utilização da energia das ondas em bóias de sinalização marítima.

Contudo, o desenvolvimento de tecnologia de aproveitamento de energia das ondas para a produção de energia eléctrica em mais larga escala teve início anos mais tarde, a meados da década de 1970, na sequência do primeiro choque petrolífero. Desde então tem havido um esforço mais ou menos continuado, em diversas partes do mundo, nomeadamente na Europa (Reino Unido, Noruega, Dinamarca, Suécia, Portugal e Irlanda), Ásia (Japão, China, Índia e Austrália) e América (Estados Unidos e México). Esse esforço iniciou-se com investigação de natureza fundamental (teórica e experimental) e prosseguiu com investigação cada vez mais aplicada, até aos dias de hoje, em que se assiste ao ensaio dos primeiros protótipos em alto mar. Paralelamente, os principais interventores nesta área deixaram de ser cientistas e universitários, para passarem a incluir técnicos e engenheiros integrados em empresas envolvidas no desenvolvimento dos protótipos referidos e na prestação de serviços e fornecimentos diversos necessários à construção, instalação e ensaio no mar desses protótipos, bem como em preparar o caminho para o desenvolvimento industrial desta tecnologia.

Actualmente, a energia das ondas é uma das formas de energia dos oceanos que apresenta maior potencial de exploração, tendo em conta a força das ondas e a imensidão dos oceanos.

Pode ser considerada uma forma concentrada da energia solar, pois é esta que, pelo aquecimento desigual da superfície terrestre, é responsável pelos ventos. Uma vez criadas as ondas

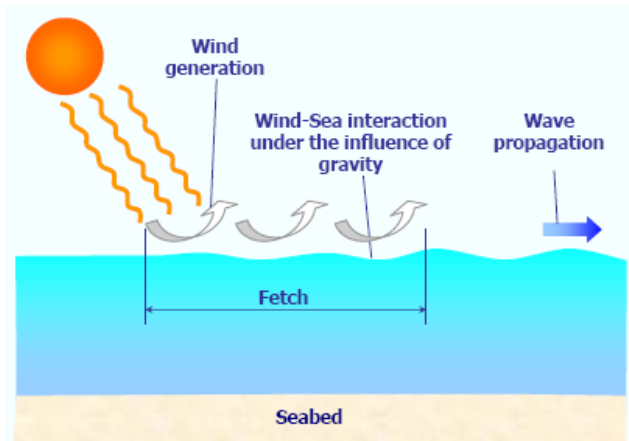


Figura 2.1 Energia das Ondas [18]

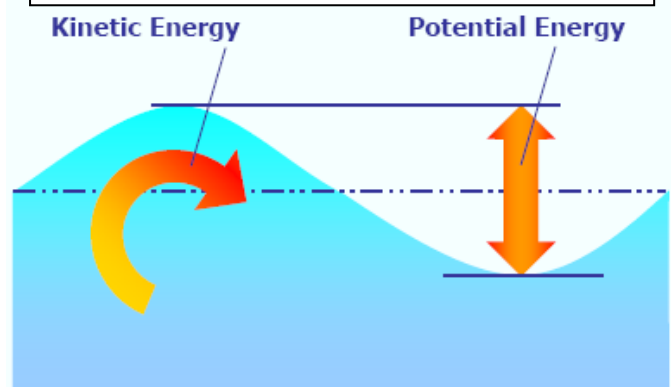


Figura 2.2 Formação das Ondas do Mar [18]

podem viajar milhares de quilómetros no alto mar praticamente sem perdas de energia. Em regiões costeiras a densidade de energia presente nas ondas diminui devido à interacção com o fundo do mar. Esta diminuição pode ser atenuada por fenómenos naturais. A potência de uma onda é proporcional ao quadrado da sua amplitude e ao seu período. Ondas de elevada amplitude (cerca de 3 m) e de período elevado (10 s) excedem normalmente os 30 kW por metro de frente de onda.

A energia das ondas apresenta-se assim como particularmente atractiva para ilhas ou países com grandes faixas costeiras, pelo que, após o choque petrolífero de 1973, países que satisfazem as condições geográficas necessárias e partilham as necessidades de importação de energia elegeram a energia das ondas em programas de carácter governamental ou em instituições de investigação e desenvolvimento.



Figura 2.3 – Distribuição do fluxo energético médio mundial, em kW/m [18]

Como a maioria das fontes de energias renováveis, a energia das ondas está distribuída desigualmente ao longo do globo. A maior actividade de ondas é encontrada entre as latitudes $\sim 30^\circ$ e $\sim 60^\circ$ em ambos os hemisférios, induzidos pelos ventos de oeste que prevalecem nessas regiões, e em sítios como o Cabo Horn (América do Sul), e costa Sudoeste (SW) da Austrália e Nova Zelândia. O recurso global atribuído à energia das ondas ronda os 2 TW, sendo assim equiparável à potência eléctrica média anual consumida mundialmente [18].

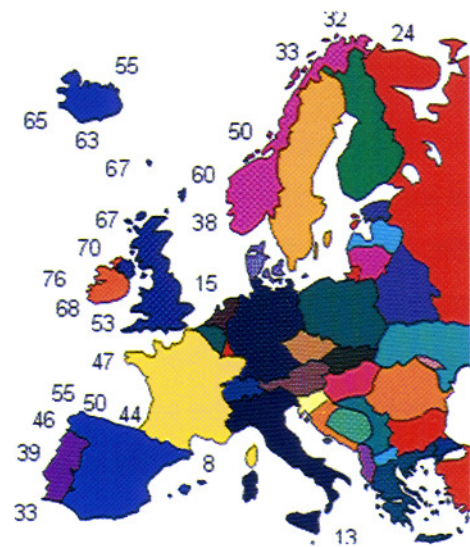


Figura 2.4 – Distribuição do fluxo energético médio europeu, em kW/m [18]

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, podemos afirmar que este recurso constitui uma mais valia para Portugal, que se encontra ainda por explorar.

Em relação aos recursos em Portugal, relativos a energia das ondas junto à costa, foi desenvolvido um atlas (ONATLAS), que consiste num atlas electrónico, contendo informação estatística sobre o clima e energia das ondas para 79 locais com cerca de 20m de profundidade, espaçados uns dos outros entre 5 e 30 km, mais 3 pontos em águas profundas, e 2 pontos em

oceano aberto. Em termos representativos, não são apresentados todos os pontos, pois os locais vizinhos apresentam o mesmo tipo de valores. Assim, essa simplificação torna o próprio atlas mais esclarecedor.

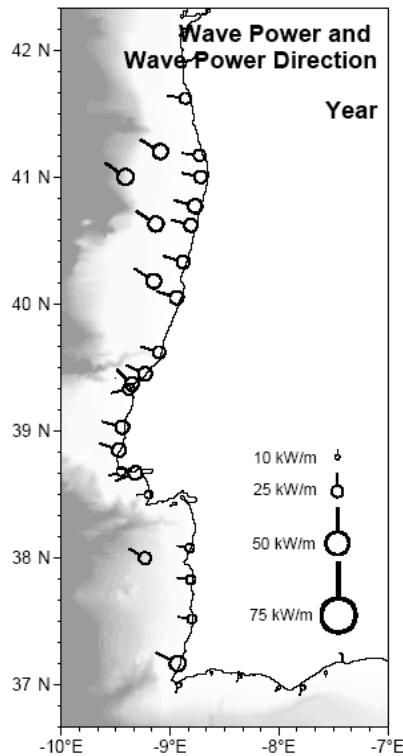


Figura 2.5 Mapa do potencial energético português, média anual (ONDATLAS)

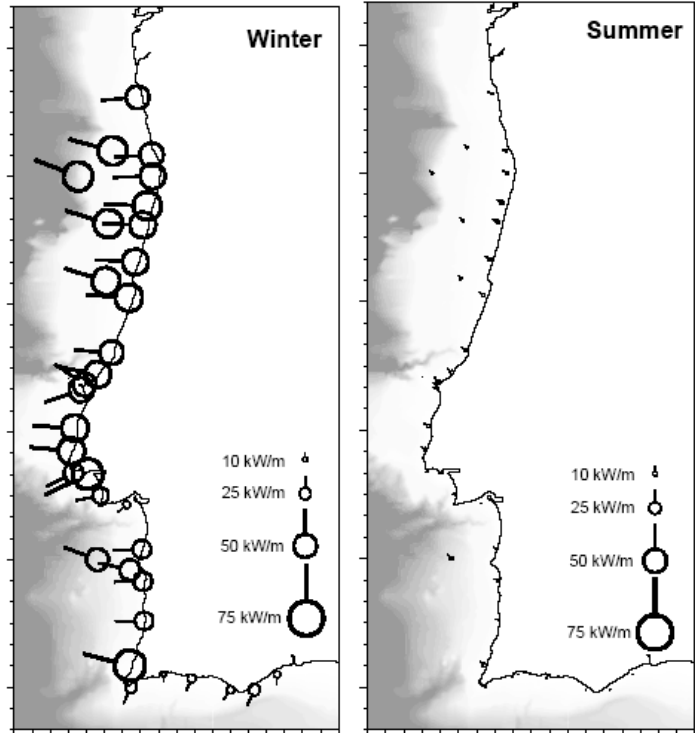


Figura 2.6 Comparação do mapa do potencial energético português, entre o Inverno (Winter) e o Verão (Summer). (ONDATLAS)

É possível observar que quantidade de energia disponível varia consideravelmente do Inverno para o Verão, sendo maior no Inverno o que coincide com os períodos de maior procura eléctrica. O atlas indica também que a costa Oeste, comparativamente à Sul, é altamente energética.

2.2 Tecnologias de Conversão

Ao longo de várias décadas têm surgido diversos tipos de dispositivos que se encontram actualmente em níveis diferentes de desenvolvimento. Estas tecnologias não são concorrentes na actualidade, situação que poderá ser alterada num futuro próximo, tal como não será correcto afirmar que estas serão as únicas soluções possíveis, dado o crescente interesse neste domínio e a permanente entrada de novas ideias, empresas e outras instituições nesta área.

Os dispositivos de extracção de energia das ondas podem ser instalados na costa, em águas pouco profundas ou ao largo, em águas de maior profundidade. De acordo com a localização dos dispositivos é habitual classificá-los em:

- i) Dispositivos sobre a costa, ou de primeira geração (*onshore*);

- ii) Dispositivos próximas da costa, assentes no fundo entre 10 a 25m de profundidade, ou de segunda geração (*nearshore*);
- iii) Dispositivos ao largo, ou de terceira geração (*offshore*).

A principal diferença entre os dispositivos near-shore e os offshore resulta das profundidades envolvidas. No primeiro caso as profundidades serão normalmente inferiores a 20 m e os dispositivos serão assentes no fundo do mar, enquanto no segundo caso rondarão os 50 m e os dispositivos serão flutuantes. É importante notar que o regime de ondas é mais energético em profundidades de 50 m do que em profundidades de 20 m.

Os dispositivos costeiros revelam vantagens importantes em termos de facilidade de acesso e ausência de amarrações, mas apresentam alguns inconvenientes, nomeadamente restrições em termos da sua localização associadas a requisitos de profundidade de água e boa exposição, maior impacte ambiental, sobretudo visual e um nível de potência média das ondas mais reduzido, em relação ao largo, devido aos efeitos dissipativos de energia por rebentação e atrito no fundo.

2.2.1 Dispositivos Onshore

Os dispositivos costeiros são aqueles que se encontram fixos ou que são construídos de raiz na orla costeira. Esta proximidade confere-lhes, tal como foi dito anteriormente, vantagens imediatas, tais como uma maior facilidade de instalação e manutenção, ausência de grandes extensões de cabos submarinos e de sistemas de fixação complexos, mas retiram-lhes a possibilidade de usufruírem dos regimes mais poderosos de ondas, característicos de zonas de grande profundidade. De facto os efeitos de dissipação de energia devidos ao atrito (fruto da interacção entre a onda e o fundo do mar) manifestam-se para profundidades inferiores a 80 m e os associados à rebentação das ondas são dominantes para profundidades inferiores a 10 m, pelo que em média um dispositivo costeiro tem apenas disponível entre 25% e 50% do recurso disponível para um dispositivo afastado da costa. Esta limitação pode ser parcialmente eliminada no processo de selecção do local de implementação do dispositivo, procurando-se zonas onde existe

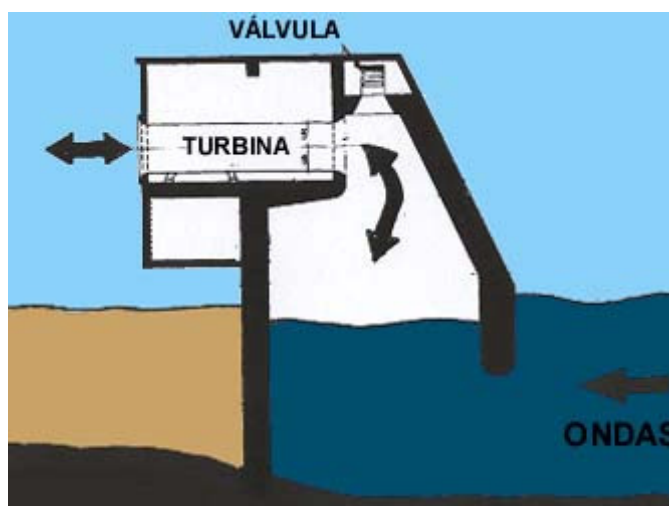


Figura 2.7 – Esquema da Central de Coluna de Água Oscilante

uma concentração natural de energia, as chamadas hot spots. Outra limitação relevante prende-se com as preocupações ao nível dos impactes ambientais (nomeadamente na salvaguarda do meio envolvente do dispositivo).

Dentro da classe dos dispositivos costeiros aquela que se destaca, pelo número de aplicações e pela investigação de que foi alvo, é a dos dispositivos de coluna de água oscilante (CAO), denominados na nomenclatura Inglesa por OWC (*Oscillating Water Column*).

O sistema de coluna de água oscilante é constituído por uma câmara pneumática que comunica com a água exterior através de uma abertura na parte inferior da parede frontal e com a atmosfera através de um orifício colocado na parte superior, onde existe uma turbina de ar em paralelo com uma válvula de alívio. As ondas, ao incidirem na estrutura, provocam uma oscilação do nível da superfície livre da água no seu interior. Isto origina um fluxo de ar em sentidos alternados, accionando a turbina, à qual está acoplado um gerador eléctrico.

A potência destas centrais depende do número de turbinas instaladas, sendo habitual utilizar grupos de cerca de 0,5 MW de potência instalada. Este limite tem a ver com as amplitudes de pressão de ar que normalmente é possível criar neste tipo de centrais e com as dimensões máximas das turbinas (inferiores a 2,5 m de diâmetro).

Tratando este projecto sobre a “Qualidade de Energia entregue à Rede” neste tipo de centrais, voltaremos a falar sobre CAO mais à frente.

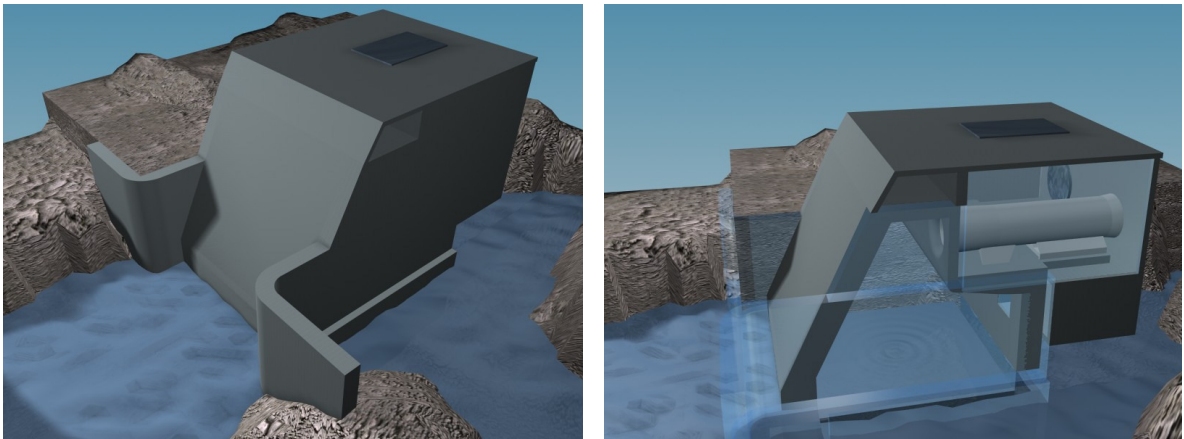


Figura 2.8 – Perspectivas de uma Central de Coluna de Água Oscilante

2.2.2 Dispositivos Nearshore

Como já foi mencionado o conceito de “proximidade” da costa deve ser interpretado em termos da profundidade evidenciada em zonas mais ou menos afastadas da costa. Os sistemas *Nearshore* são sistemas instalados em águas pouco profundas, perto dos 20m. Desta forma os dispositivos do tipo CAO instalados em quebra-mares, referidos anteriormente, podem ser englobados nesta categoria, dado que um quebra-mar ou um molhe não constitui uma linha de costa natural. A incorporação de dispositivos nestas estruturas tem vantagens adicionais, pois elas já existem em muitos casos e uma estrutura adicional pode até reforçar o seu objectivo inicial (por exemplo protecção costeira).

Chegou a estar previsto, na construção dos novos molhes a norte da Foz do Douro, uma Central do tipo CAO, o que nunca se veio a materializar. Esta Central foi projectada com a exploração inicial de duas turbinas, com potência instalada de 500 kW, sendo que numa segunda fase seriam instaladas mais duas turbinas, perfazendo uma potência total da central de 1 MW.

O OSPREY (Ocean Swell Powered Renewable EnergY) foi desenvolvido em meados da década de 1990 pela empresa escocesa Wavegen, como sistema isolado de CAO, para ser colocado próximo da costa, em águas de cerca de 14 m de profundidade. Era constituído por uma estrutura metálica de parede dupla, que deveria ser rebocada até ao local de instalação, onde seria afundada através do enchimento das suas paredes ocas, com materiais densos, ficando assente no mar.

A ocorrência de um acidente na fase de afundamento levou à interrupção do projecto, em 1995. Existem planos para recuperar este projecto, associando uma turbina eólica offshore a uma destas centrais.

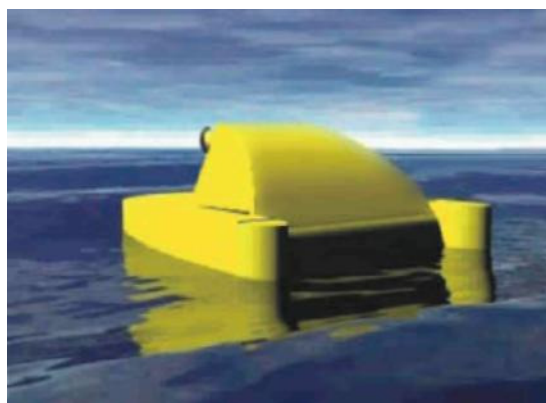
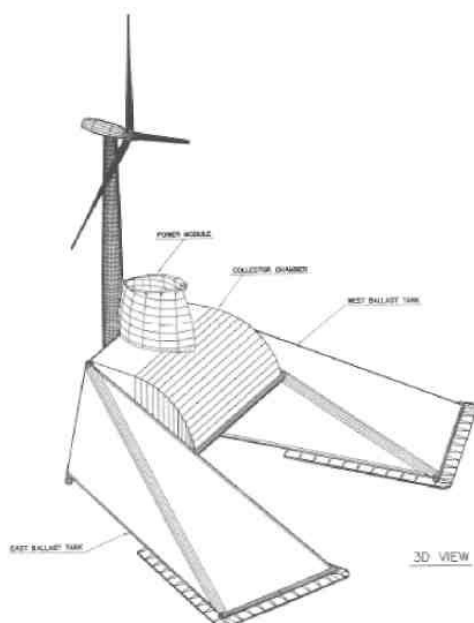


Figura 2.9 - Antevião artística do OSPREY [18]

Figura 2.10 - Modelo do OSPREY com a inclusão do aerogerador para aproveitamento eólico [18]

2.2.3 Dispositivos Offshore

Os dispositivos flutuantes instalados ao largo, além de permitirem explorar mais plenamente o recurso energético em águas de maior profundidade, apresentam menos restrições quanto à sua localização e têm certamente um menor impacto visual. Estes dispositivos têm, no entanto, de lidar com diversas dificuldades relacionadas principalmente com a sua manutenção, transporte de energia para terra e processos de ancoragem ao fundo. Os dispositivos offshore que tem sido propostos apresentam princípios de funcionamento bastante distintos. Serão mencionados os que já atingiram um nível avançado de desenvolvimento ou estão actualmente em fase de ensaios no mar, nomeadamente:

- **Archimedes Wave Swing (AWS)**

É um dispositivo cilíndrico de absorção pontual, completamente submerso com um corpo superior oco (flutuador) que oscila verticalmente sobre uma base fixa, também oca. O interior dos dois corpos é preenchido por ar sob pressão, de tal forma que, na ausência de ondas, a pressão do ar interior produz uma força ascendente sobre o flutuador que equilibra o seu peso e a força resultante da pressão hidrostática produzida pela água exterior. Durante a passagem de uma onda, a pressão exterior oscila em torno da pressão hidrostática, provocando a oscilação vertical do flutuador sobre a base, num processo em que o ar interior actua como mola pneumática, produzindo uma força vertical de restituição. A mola pneumática e a massa do flutuador são projectados para estar em ressonância com a frequência dominante das ondas incidentes e dentro dos limites podem ser ajustadas dinamicamente. O movimento entre o flutuador e a base é utilizado para actuar um gerador de indução linear, que liga estas duas partes do AWS, desta forma convertendo directamente a energia mecânica contida neste movimento em energia eléctrica.

O dispositivo AWS, relativamente a outros dispositivos, apresenta a vantagem de ser completamente submerso, eliminando desta forma possíveis impactes visuais e, por outro lado, evitando a acção destruidora das ondas junto à superfície em mar tempestuoso.

Foi instalada uma central piloto de 2 MW ao largo de Póvoa de Varzim (ca. De 6 km da costa, em 43 m de profundidade). A sua estrutura, em aço, foi construída na Roménia e rebocada para montagem final em Viana do Castelo. Esta central, projectada para realização de ensaios, foi construída sobre uma barçaça com mecanismos de

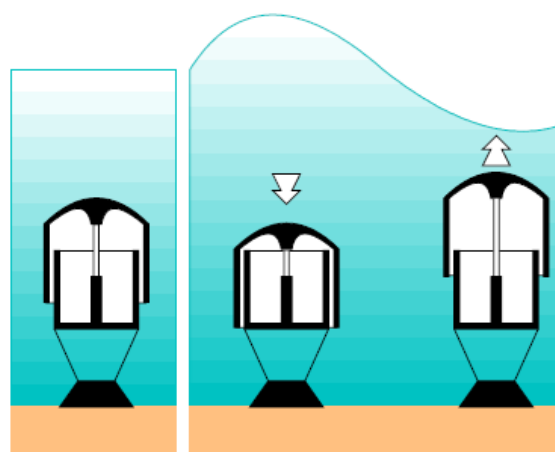


Figura 2.11 – Esquema de funcionamento do dispositivo AWS [16]

submersão e emersão para facilitar as operações de manutenção. A submersão da central piloto foi muito mais complexa do que inicialmente se previa, tendo sido desenvolvido, após duas tentativas falhadas, um novo sistema de submersão, com base numa simulação matemática rigorosa do processo, que permitiu efectuar com sucesso a submersão do dispositivo em Maio de 2004.

• WaveDragon

É um dispositivo flutuante para aplicação no alto mar. O seu princípio de funcionamento baseia-se na acumulação de água num reservatório sobrelevado relativamente ao nível médio da superfície livre do mar. A água acumulada é devolvida ao mar através de turbinas hidráulicas Kaplan de baixa queda que accionam geradores eléctricos de fabrico comum. A acumulação da água no reservatório sobrelevado produz-se através do galgamento de uma rampa inclinada pela onda. Para aumentar o desnível de galgamento, existem dois reflectores parabólicos colocados a montante da rampa que nela concentram a onda incidente.

Para além da estrutura metálica, que inclui os dois concentradores parabólicos, este sistema requer as turbinas Kaplan, os geradores eléctricos, os sistemas de aquisição e controlo, os sistemas auxiliares e o sistema de amarração.

Desde Maio de 2003 que uma central piloto de 20 kW de potência máxima está a funcionar em Nissum Bredning/Dinamarca, uma zona marítima protegida no mar do Norte, numa zona de profundidade de 6 m. A estrutura deste dispositivo tem um peso absoluto de 260 toneladas, o reservatório tem as dimensões de 26 m x 17 m x 3.6 m e uma capacidade de 55 m³ e a boca do dispositivo à entrada dos concentradores parabólicos (envergadura) é de 58 m.

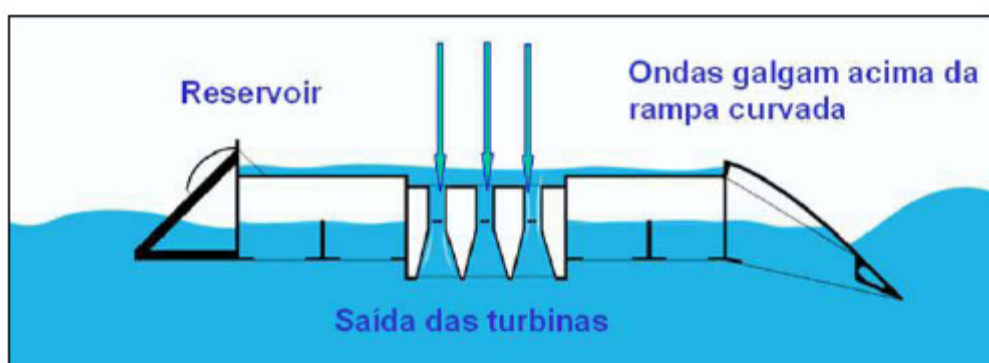


Figura 2.12 – Central piloto em Nissum [16]



Figura 2.13 – Bredning/Dinamarca [16]

• Pelamis

É uma estrutura semi-submersa composta por vários cilindros horizontais, ligados entre si por articulações e disposto segundo a direcção de incidência das ondas. O movimento das articulações provocado pela ondulação é resistido por cilindros hidráulicos que bombeiam óleo em alta pressão para motores hidráulicos. Os motores hidráulicos accionam geradores eléctricos, sendo a electricidade produzida por todas as articulações transportada num único cabo umbilical para um ponto de ligação no fundo. O sistema de amarração do dispositivo consiste numa combinação de flutuadores e pesos, evitando tensões excessivas nos cabos de amarração, mas permitindo a orientação dinâmica do dispositivo em relação à frente de onda. A instalação do dispositivo é relativamente independente da profundidade de água e das condições geomorfológicas do fundo.

Tal como o WaveDragon este dispositivo foi desenvolvido com base na utilização de tecnologias existentes (sistema de amarração, sistema hidráulico, gerador e cabos eléctricos).

Um protótipo construído e actualmente testado em Orkney/Escócia tem um comprimento de 120 m, é composto por 3 secções cilíndricas, com diâmetro de 3,5 m e disponibiliza uma potência máxima de $3 \times 250 \text{ kW} = 750 \text{ kW}$. Cada secção contém um módulo completo de geração

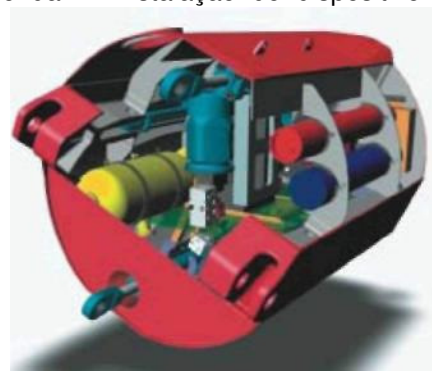


Figura 2.14 – Módulo de conversão de energia do Pelamis [18]

de energia eléctrica. Independentemente das características do local da instalação, o construtor, a empresa escocesa Ocean Power Delivery Lda, prevê uma produção média até cerca de 40% da potência instalada (isto é, até 3500 horas equivalentes de funcionamento à potência nominal).



Figura 2.15 – Dispositivo Pelamis [18]

• AquaBuoy

O dispositivo AquaBuoy consiste numa bóia circular, fixa por uma amarração flexível permitindo o seu movimento vertical, com um longo tubo vertical sob a bóia, designado por tubo de aceleração. A massa de água amortecedora contida no tubo de aceleração actua como corpo de referência do movimento. O movimento relativo entre a bóia e a massa de água amortecedora é transferido, por um cilindro no tubo de aceleração, para um (sub-) sistema de conversão localizado no corpo do flutuador. No dispositivo 'Hosepump' o tubo rígido é substituído por uma conduta de material flexível (geotextil, borracha), dispensando o uso do cilindro, sendo a bombagem de água sob pressão provocada pela extensão e compressão periódica da conduta flexível.



Figura 2.16 – Módulo de conversão de energia do AquaBuoy [16]

No dispositivo 'Hosepump' o tubo rígido é substituído por uma conduta de material flexível (geotextil, borracha), dispensando o uso do cilindro, sendo a bombagem de água sob pressão provocada pela extensão e compressão periódica da conduta flexível.

O sistema de conversão previsto para o protótipo Aquabuoy é uma turbina Pelton, que ainda não foi utilizada por outros dispositivos.

Em 2003 foi assinado um contrato de compra para a energia eléctrica proveniente de um sistema Aquabuoy em Port Angeles, no estado de Washington. O parque demonstrador consiste em 4 dispositivos instalados em Makah Bay, ca. de 5 km afastado da costa, com uma capacidade instalada de 4 x 250 kW.

3. Qualidade de Energia

A qualidade da energia eléctrica constitui, na actualidade, um factor crucial para a competitividade de praticamente todos os sectores industriais e dos serviços.

Neste âmbito, e tendo em conta o aumento do interesse e investimento nas energias renováveis, e em especial na produção de energia através das ondas, é fundamental saber da qualidade da energia que é produzida em Centrais CAO.

A qualidade da energia produzida neste tipo de Central está directamente relacionada com a Estratégia de Controlo implementada na estação. Estratégia esta, que tem como principal objectivo conseguir o melhor compromisso entre as oscilações da potência eléctrica e o desempenho da central em termos de energia entregue à rede.

3.1 Problemas de Qualidade de Energia Eléctrica

Entre os problemas de qualidade de energia, a interrupção do fornecimento é, incontestavelmente, o mais grave, uma vez que afecta todos os equipamentos ligados à rede eléctrica, à excepção daqueles que sejam alimentados por UPS's (*Uninterruptable Power Supplies* – sistemas de alimentação ininterrupta) ou por geradores de emergência. Contudo, outros problemas de qualidade de energia, como os descritos a seguir, além de levarem à operação incorrecta de alguns equipamentos, podem também danificá-los:

- Distorção Harmónica: Quando existem cargas não lineares ligadas à rede eléctrica a corrente que circula nas linhas contém harmónicos e as quedas de tensão provocadas pelas componentes harmónicas nas impedâncias das linhas faz com que as tensões de alimentação fiquem também distorcidas.
- Ruído (Interferência Electromagnética): Corresponde ao ruído electromagnético de alta-frequência, que pode ser produzido pelas comutações rápidas dos conversores electrónicos de potência.
- Inter-Harmónicas: Surgem quando há componentes de corrente que não estão relacionadas com a componente fundamental (50 Hz); essas componentes de corrente podem ser produzidas por fornos a arco ou por cicloconversores (equipamentos que, alimentados a 50 Hz, permitem sintetizar tensões e correntes de saída com uma frequência inferior).

- Interrupção Momentânea: Ocorre, por exemplo, quando o sistema eléctrico dispõe de disjuntores com religador, que abrem na ocorrência de um curto-circuito, fechando-se automaticamente após alguns milissegundos (e mantendo-se ligados caso o curto-circuito já se tenha extinguido).
- Subtensão Momentânea (Voltage Sag): Também conhecido por “cava de tensão”, pode ser provocada, por exemplo, por um curto-circuito momentâneo num outro alimentador do mesmo sistema eléctrico, que é eliminado após alguns milissegundos pela abertura do disjuntor do ramal em curto.
- Sobretensão Momentânea (Voltage Swell): Pode ser provocada, entre outros casos, por situações de defeito ou operações de comutação de equipamentos ligados à rede eléctrica.
- Flutuações de Tensão (Flicker): Acontece devido a variações intermitentes de certas cargas, causando flutuações nas tensões de alimentação (que se traduz, por exemplo, em oscilações na intensidade da iluminação eléctrica).
- Micro-Cortes de Tensão (Notches): Resultam de curto-circuitos momentâneos, que ocorrem durante intervalos de comutação dos semicondutores de potência dos rectificadores.
- Transitórios: Ocorrem como resultado de fenómenos transitórios, tais como a comutação de bancos de condensadores ou descargas atmosféricas.

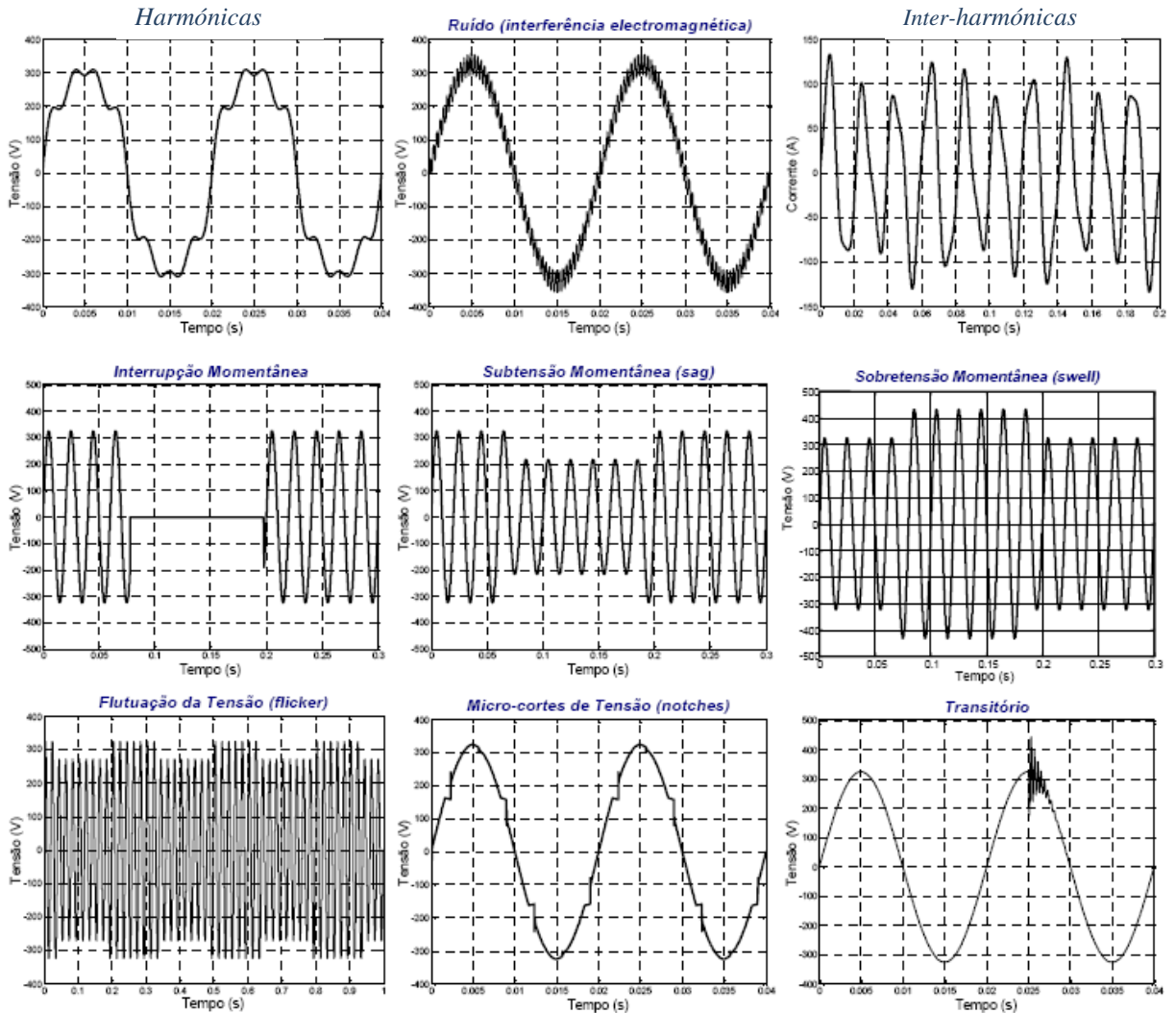


Figura 3.1 – Problemas de Qualidade de Energia Eléctrica [13]

3.2 Fontes de Poluição Harmónica na Rede

Grande parte dos problemas que surgem nos sistemas eléctricos tem origem na excessiva distorção das correntes ou tensões junto ao consumidor final.

A principal causa deste fenómeno, que pode ser visto como um tipo de poluição do ambiente electromagnético, é a crescente popularidade dos equipamentos electrónicos alimentados pela rede eléctrica, tais como computadores, aparelhos de televisão, balastros electrónicos para lâmpadas de descarga, controladores electrónicos para uma enorme variedade de cargas industriais, etc.

Quase todos os equipamentos electrónicos com alimentação monofásica ou trifásica incorporam um circuito rectificador à sua entrada, seguido de um conversor comutado do tipo *CC-CC* ou *CC-CA*. Um dos tipos de rectificadores mais utilizados em equipamentos de baixa potência é o rectificador monofásico de onda completa com filtro capacitivo, que possui uma corrente de entrada

altamente distorcida. O elevado conteúdo harmónico da corrente distorce a tensão de alimentação devido à queda de tensão na impedância das linhas.

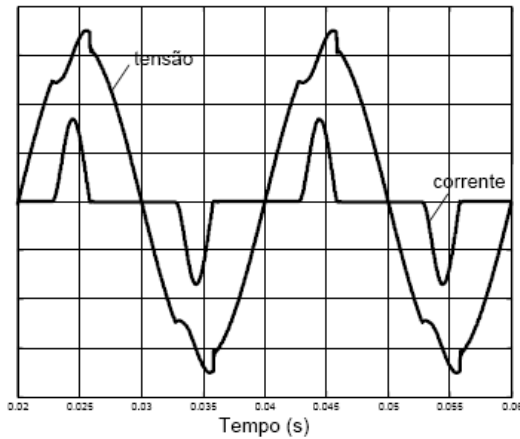


Figura 3.2 – Formas de onda da tensão e da corrente de entrada de um Rectificador monofásico com filtro capacitivo [13]

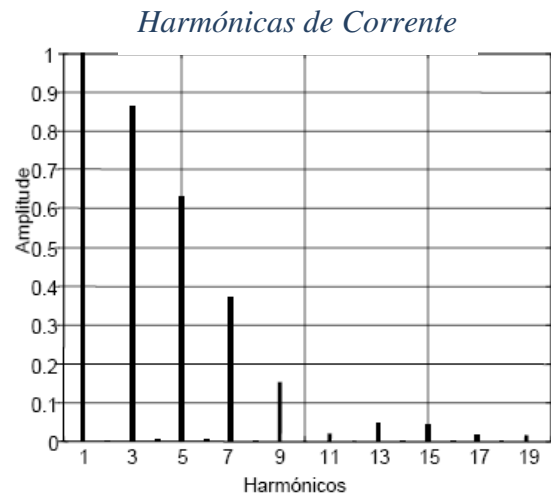


Figura 3.3 – Harmónicas da corrente [13]

Mesmo as lâmpadas fluorescentes normais contribuem significativamente para as harmónicas na rede, devido ao comportamento não linear das descargas em meio gasoso e ao circuito magnético do balastro, que pode operar na região de saturação.

Para além da distorção das formas de onda, a presença de harmónicas nas linhas de distribuição de energia origina problemas em equipamentos e componentes do sistema eléctrico, nomeadamente:

- Aumento das perdas (aquecimento), saturação, ressonâncias, vibrações nos enrolamentos e redução da vida útil de transformadores.
- Aquecimento, binários pulsantes, ruído audível e redução da vida útil das máquinas eléctricas rotativas.
- Disparo indevido dos semicondutores de potência em rectificadores controlados e reguladores de tensão.
- Problemas na operação de relés de protecção, disjuntores e fusíveis.
- Aumento nas perdas dos condutores eléctricos.
- Aumento considerável na dissipação térmica dos condensadores, levando à deterioração do dieléctrico.

- Redução da vida útil das lâmpadas e flutuação da intensidade luminosa (*flicker* – para o caso de ocorrência de sub-harmónicas).
- Erros nos medidores de energia eléctrica e instrumentos de medida.
- Interferência electromagnética em equipamentos de comunicação.
- Mau funcionamento ou falhas de operação em equipamentos electrónicos ligados à rede eléctrica, tais como computadores, controladores lógicos programáveis (PLCs), sistemas de controlo comandados por microcontroladores, etc.

3.3 Soluções para os Problemas de Qualidade de Energia Eléctrica

A solução para os problemas de qualidade de energia eléctrica tradicionais (exceptuando as interrupções de serviço prolongadas) passa pela utilização de alguns dos seguintes condicionadores de rede eléctrica:

- Os varístores (TVSS – *Transient Voltage Surge Suppressors*) garantem protecção contra picos de tensão nas linhas.
- Os filtros de interferência electromagnética ajudam a prevenir o problema dos micro cortes de tensão e garantem que o equipamento poluidor não conduz ruído de alta frequência para a rede eléctrica.
- Os transformadores de isolamento com blindagens electrostáticas garantem não só isolamento galvânico como também evitam picos de tensão de modo comum ou entre linhas.
- Os transformadores ferro-ressonantes asseguram a regulação de tensão bem como a filtragem de picos de tensão entre linhas.
- A regulação de tensão pode também ser garantida por meio de transformadores com várias saídas associados a um esquema electrónico de comutação por meio de triacs ou tirístores montados em antiparalelo.

As interrupções prolongadas de fornecimento de energia eléctrica obrigam à utilização de fontes de alimentação sem-interrupção (UPS's) ou a qualquer outra forma alternativa de geração de energia, como os geradores de emergência.

A solução para alguns problemas de qualidade de energia eléctrica obriga à utilização de conversores comutados (ou ressonantes). É o caso do problema das harmónicas.

4. Abordagem Metodológica – Estudo da Tecnologia

A grande maioria dos dispositivos de extração de energia das ondas é oscilante, apresentando um rendimento dependente da frequência das ondas incidentes e da amplitude de oscilação de quantidades físicas relevantes (como por exemplo, a velocidade para corpos oscilantes e a pressão para sistemas de coluna de água oscilante). Se a frequência da onda incidente coincidir com a frequência natural de oscilação do dispositivo, diz-se que este se encontra em ressonância com a onda incidente. Neste caso, para corpos oscilantes, a velocidade de oscilação e a força excitadora estão em fase, verificando-se o mesmo resultado para a pressão e para o caudal de difracção nos sistemas de coluna de água oscilante. Assim, a potência fornecida ao sistema pela onda incidente nunca será negativa. No entanto, se a frequência da onda incidente não for idêntica à frequência própria do dispositivo, a potência fornecida ao sistema pela onda incidente será negativa para dois sub – intervalos do ciclo de onda.

Para que se possa extrair a máxima energia das ondas também é necessário que a característica da turbina seja controlada. Assim, Sarmento e Falcão [2] verificaram que, para um sistema de coluna de água oscilante em ressonância com a onda incidente, é necessário que a característica da turbina seja correctamente escolhida, de maneira a que uma dada relação entre esta, a pressão e o caudal de difracção seja verificada para que se possa extrair a máxima energia da onda incidente.

Para ondas reais não é possível que o sistema se encontre em ressonância com todas as frequências que constituem o espectro, pelo que será necessário desenvolver métodos de controlo que procurem maximizar a energia extraída às ondas. Nos anos 70, Budal e Falnes [11], abordaram este problema, propondo que se controlasse o sistema mecânico de conversão de energia de maneira a que se pudesse extrair a máxima energia possível às ondas. Verificaram que poderia ser necessário fornecer energia às ondas em determinados intervalos de tempo. Em Budal e Falnes [11], propõe-se um sistema de controlo de fase para corpos flutuantes, que consiste em imobilizar o dispositivo em determinadas posições, procurando que a força excitadora devido à onda incidente esteja em fase com a velocidade do corpo. Este mesmo método, denominado “latching”, foi aplicado e analisado para sistemas de coluna de água oscilante, por Hoskine e outros [29], Jeffreys e Whittaker [32], Nichols e outros [48] e Justino e outros [50]. Essencialmente, consiste em usar uma válvula em série com a turbina que permite ou não o escoamento de ar.



Figura 4.1 – Corte lateral de uma Central CAO [3]

Sarmento e outros [1] propuseram a utilização de uma turbina de geometria variável, em que o ângulo de calagem das pás do rotor é

variável, de maneira a se poder proceder ao controlo de fase. Verificaram que para extrair a máxima energia às ondas seria necessário que a turbina trabalhasse como um compressor em determinados sub-intervalos de tempo, reduzindo, assim, consideravelmente, o seu rendimento médio. Para evitar este efeito indesejável, propuseram a aplicação de um controlo *sub-optimal* que limitasse o trabalho de compressão de turbina, de maneira a que o rendimento desta não fosse significativamente comprometido.

A inclusão no sistema de coluna de água oscilante de uma válvula em série, ou em paralelo, que limite o caudal de ar que passa na turbina de maneira a que não entre em perda, possibilita que o rendimento médio desta seja melhorado. Embora as duas válvulas, do ponto de vista da turbina, sejam igualmente eficazes a limitar o caudal que passa nesta, o desempenho hidrodinâmico do sistema será diferente, pois, se se aplicar uma válvula ou outra, a pressão no interior da câmara não será igual. Falcão e Justino [3], [4] abordaram a utilização destas válvulas no controlo de ar que passa na turbina.

Outras estratégias têm por objectivo controlar o binário que o gerador eléctrico aplica ao veio da turbina, de maneira a que a velocidade de rotação desta, seja a mais adequada às condições de mar a que a central está sujeita. No entanto, estas estratégias devem ter em consideração a qualidade da energia eléctrica entregue à rede e as condições de operação do grupo turbina-gerador, em termos de velocidade de rotação. Também deverão ser consideradas as limitações que a electrónica de potência e o gerador impõem em termos de potências disponíveis para estes sistemas. Justino e Falcão [51], [52] propõem e analisam estratégias de controlo que actuam no binário eléctrico imposto pelo gerador.

É de referir também que, o armazenamento de energia cinética, num volante de inércia, pode filtrar as variações de potência associadas às oscilações de pequeno período com uma escala de tempo da ordem de meio período de onda (4 a 6 s) e ajudará a filtrar as variações associadas ao agrupamento de ondas com uma escala de tempo da ordem de algumas dezenas de segundos.

4.1 Turbina

A turbina de ar é o elemento mais crítico na conversão de energia e é onde ocorre a maioria das perdas de energia, razão pela qual se tem dado tanta importância à aerodinâmica da turbina. Nas centrais de CAO, a turbina de ar está sujeita a condições bastante adversas comparativamente a outras aplicações, como é o caso das turbinas eólicas.

Neste tipo de centrais, o fluxo de ar que atravessa a turbina é aleatório e altamente variável sobre diversas escalas de tempo, variando constantemente

dependendo das variações sazonais. Não surpreende, assim, que a eficiência de

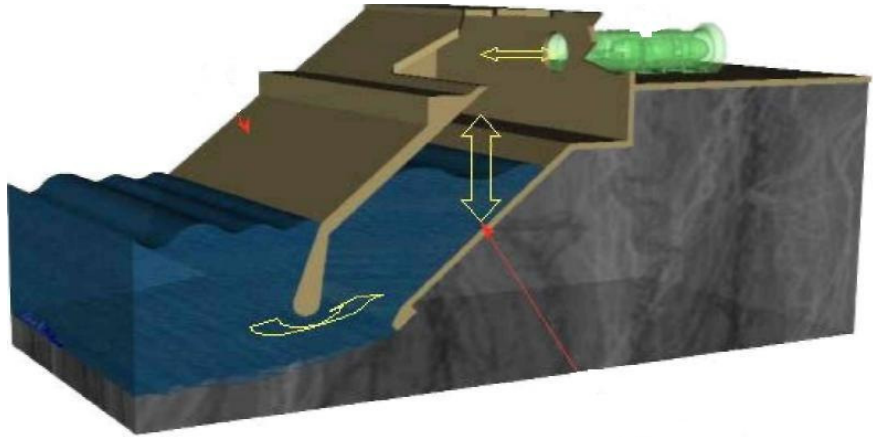


Figura 4.2 – Esquema da Central de Coluna de Água Oscilante (cortesia Wavegen)

uma turbina de ar de uma CAO seja substancialmente mais baixa do que uma turbina de água, vapor, gás ou vento, que trabalham em circunstâncias quase constantes.

Para aplicação em centrais CAO foram propostos, e em alguns casos usados, diferentes turbinas para a conversão da energia das ondas.

4.1.1 Turbina de Wells

A turbina inventada por volta de 1977, em Belfast, pelo Dr. A. A. Wells tem vindo a ser profundamente estudada, e é reconhecida internacionalmente como a mais indicada para equipar sistemas de CAO. Trata-se de uma turbina de ar axial, constituída basicamente por um rotor de pás de perfil simétrico, sem torção, dispostas radialmente com um ângulo de calagem de 90°. Embora não atinja um rendimento máximo tão elevado como o de uma turbina convencional, tem a vantagem importante de alcançar velocidades de rotação elevadas com velocidades de



Figura 4.3 – Turbina de Wells

escoamento de ar relativamente baixas. São deste tipo as turbinas que equipam as centrais de coluna de água oscilante de Bergen e Islay, bem como a central da ilha do Pico; por rodarem no mesmo sentido, independentemente do sentido do fluxo de ar que as atravessa.

A turbina de Wells tem vindo a ser estudada intensivamente nos últimos anos, por diversas equipas de investigação, especialmente no Reino Unido, Japão e Portugal. Embora tenha sido construída na Noruega uma turbina de 500 kW, que está em funcionamento desde o final de 1985 na central de CAO de Bergen, não se conhecem trabalhos noruegueses publicados sobre esta turbina.

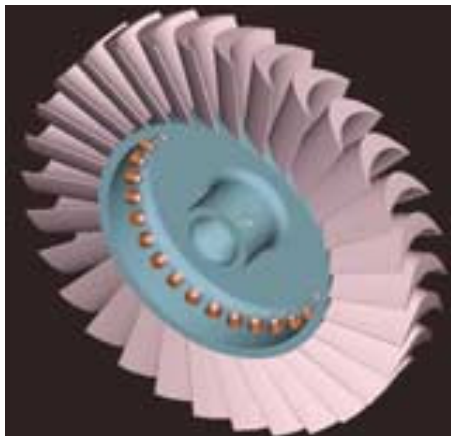


Figura 4.4 – Rotor de uma Turbina de Wells [38]

Têm sido estudadas versões com e sem pás directrizes. A força aerodinâmica produzida pelo escoamento nas pás do rotor tem uma componente na direcção tangencial que depende do ângulo de incidência do escoamento relativo, mas permanece inalterada se o escoamento for invertido. O binário é negativo ou muito pequeno se a relação entre o caudal e a velocidade de rotação estiver fora de uma determinada gama de funcionamento. Para valores abaixo desta, o ângulo de incidência é muito pequeno e o binário é dominado pelas forças de resistência das pás. Para valores acima desta gama, têm-se ângulos de incidência muito elevados, observando-se a separação do escoamento nas pás do rotor.



Figura 4.5 – Estator de uma Turbina de Wells e respectivas pás directrizes [37]

Os primeiros estudos sobre a aerodinâmica da turbina de Wells foram efectuados no Reino Unido (pouco tempo depois da turbina ser proposta), nos *Marchwood Engineering Laboratories* (MEL) do *Central Electricity Generating Board* (CEGB), tendo sido considerada uma versão com pás directrizes. Foi então apresentado por D.P.Sturge o primeiro modelo teórico para a caracterização do funcionamento deste tipo de turbina. Trata-se de uma análise bidimensional simplificada. Nesse modelo, as características aerodinâmicas das pás do rotor são calculadas a partir dos valores obtidos experimentalmente em perfis isolados, introduzindo um factor de correlação, calculado com o auxílio do método das singularidades de Martensen, para tomar em consideração o efeito da

interferência dos perfis em cascata.

Os estudos da turbina de Wells prosseguiram no MEL, tendo Grant e Johnson ensaiado um modelo de turbina com 0,4 m de diâmetro, com uma dupla coroa de pás directrizes, e medido, em regime estacionário, um rendimento máximo da turbina (deduzidas as perdas mecânicas) de 71%. Uma das turbinas instaladas no Kamei (Japão) foi projectada pela equipa MEL. Apesar de os

resultados serem encorajadores, a actividade de investigação neste domínio terminou no MEL por volta de 1981, provavelmente por falta de interesse do CEGB no aproveitamento da energia das ondas.

Presentemente, os grupos com maior actividade de investigação nesta área encontram-se na *Queen's University de Belfast* (Reino Unido), nas Universidades de Tokyo, Saga e Kyushu (Japão) e no *Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI)* e *Instituto Superior Técnico (IST)*

em Portugal. A análise teórica apresentada pelos investigadores destas instituições é basicamente a de Sturge, adaptada às várias geometrias consideradas. A actividade destas equipas tem sido predominantemente de natureza experimental.



Figura 4.6 – Turbina de Wells e Gerador na Central do Pico (Açores) [25]

4.1.2 Outros tipos de Turbinas

Uma solução possível para lidar com o escoamento oscilante consiste no uso de uma turbina de ar mais ou menos convencional (não muito diferente das turbinas de vapor e gás), recorrendo a um sistema de condutas e válvulas rectificadoras do escoamento. Esta foi a solução adoptada pelo *National Engineering Laboratory de Glasgow*. As turbinas auto-rectificadoras têm um plano de simetria normal ao eixo de rotação e são desenhadas de modo a que o binário e a velocidade de rotação sejam independentes do sentido do fluxo de ar que as atravessa, dispensando, assim, o sistema de rectificação por válvulas. Várias turbinas com esta característica têm sido propostas para este fim. As turbinas de Agnelo David e I. A. Babisten, e de G. D. Filipenco, são de concepção idêntica, diferindo no número de andares. Analisando os triângulos de velocidade conclui-se que são de esperar perdas por choque apreciáveis na segunda coroa de pás directrizes. Esta deverá ser a razão por que este tipo de turbina nunca foi adoptado por nenhuma das equipas de investigação ligada ao desenvolvimento de sistemas de extracção da energia das ondas.

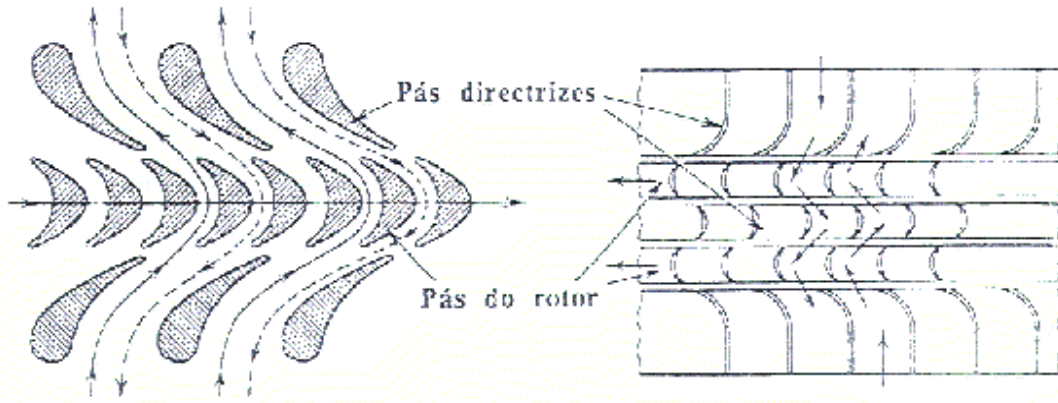


Figura 4.7 – Turbina de Agnelo David e Babisten

Figura 4.8 – Turbina de Filipenco

A turbina proposta por McCormick tem a particularidade de possuir duas rodas contra-rotativas. Nos ensaios efectuados com um protótipo de 50 kW (à velocidade de 800 r.p.m) construído nos E.U.A., para equipar uma das câmaras pneumáticas de Kaimei (Japão), foi obtido um rendimento máximo, em regime estacionário, de 55%. Este valor é surpreendentemente baixo tendo em conta a geometria da turbina. No entanto, a principal desvantagem apontada a esta turbina é o custo do sistema mecânico de transmissão de potência para o gerador, que também apresenta alguns problemas de funcionamento ainda não superados satisfatoriamente.

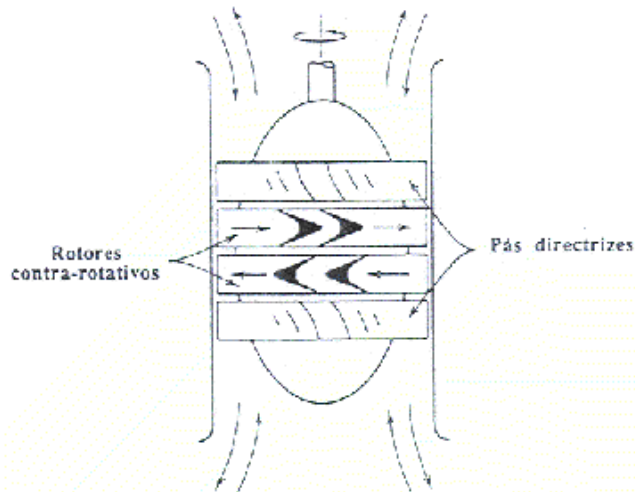


Figura 4.9 – Turbina contra-rotativa de McCormick [45]

4.2 Gerador

É o gerador que efectua a conversão da energia mecânica, entregue pela turbina, em energia eléctrica. Devido às especificidades da conversão de energia neste tipo de centrais nem todos os geradores são adequados. Ter-se-á de utilizar um gerador de velocidade variável e frequência fixa.

A velocidade do ar que impulsiona a turbina é variável em função da agitação marítima e, conseqüentemente, em função da potência disponível. Para se tirar o máximo partido da energia disponível em cada momento, a turbina deve ajustar-se às condições de fluxo do ar. Isto é conseguido através do ajustamento das pás da turbina e/ou através da variação de velocidade de rotação da turbina.

O binário mecânico que a turbina fornece ao gerador para o caso ideal de ondas incidentes monocromáticas tem a forma indicada na figura seguinte:

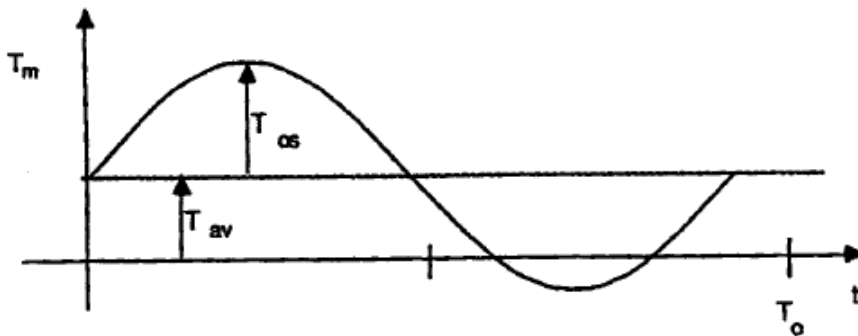
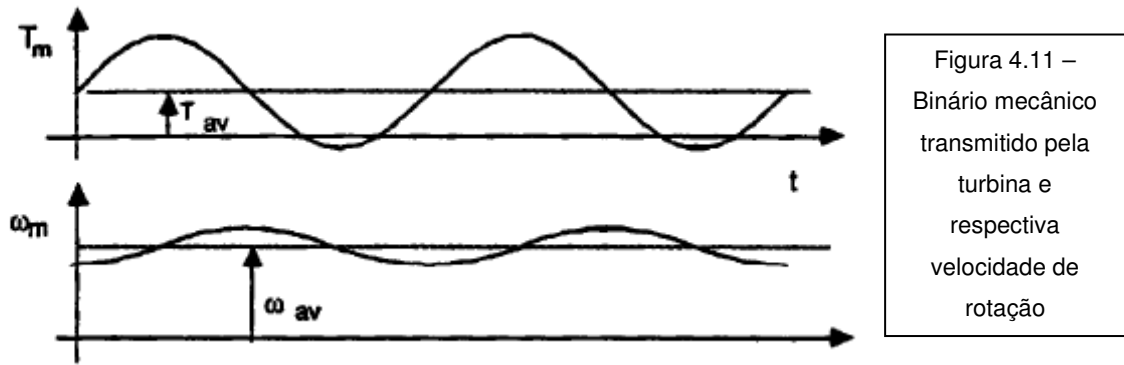


Figura 4.10 – Binário mecânico transmitido pela turbina ao gerador

O valor médio e o valor oscilatório deste binário variam consoante o estado meteorológico do mar. Admite-se que a componente oscilatória possa atingir 110% da componente média. O período do binário é igual ao período das ondas marítimas. Devido às consideráveis variações de potência neste tipo de Centrais, a grande componente oscilatória é filtrada com recurso a um volante de inércia, através da variação de velocidade.

Enquanto o binário médio da turbina (T_{av}) se mantiver constante, o gerador deve entregar uma potência constante à rede (P_{rede}), com a turbina a rodar a uma velocidade média (ω_{av}), permitindo que o conjunto turbina – volante de inércia – gerador rode a uma velocidade ($\omega(t)$) em torno de (ω_{av}), acelerando e acumulando energia no volante de inércia quando o binário da turbina T for superior a T_{av} , e desacelerando e retirando energia ao volante de inércia quando T for menor que T_{av} . Deste modo, apenas a potência resultante do binário médio é transformada em energia eléctrica e entregue à rede. A potência devida à componente oscilatória é ciclicamente entregue e retirada ao volante de inércia.

Se o conjunto turbina – gerador tiver um momento de inércia suficiente, o volante de inércia é desnecessário. A amplitude da variação da velocidade depende do valor do momento de inércia do conjunto.



A velocidade média do conjunto turbina – gerador determina a potência entregue à rede, e depende da potência disponível nas ondas marítimas. Se existir apenas uma baixa potência disponível, então o sistema funcionará a uma velocidade baixa, funcionando com uma velocidade alta para potências altas.

Isto leva à necessidade do uso de um gerador que funcione a velocidade variável (sem uso de componentes mecânicos que mudem a velocidade efectiva, uma vez que o gerador deve ser acoplado directamente à turbina) e que forneça uma corrente alternada de frequência e tensão fixas, atendendo a que vai estar ligado à rede de distribuição pública de electricidade.

Os tradicionais geradores síncronos ligados directamente à rede estão postos de parte, uma vez que a frequência da tensão gerada é imposta pela velocidade de rotação, que é controlada através da máquina primária.

4.2.1 Máquina assíncrona

A máquina assíncrona trifásica é o tipo de máquina eléctrica mais usado na indústria, principalmente pela robustez e baixo custo. Nas aplicações que não requerem controlo de velocidade predomina completamente, e em accionamentos de velocidade variável até às centenas de kW está a generalizar-se o seu uso com conversores electrónicos.

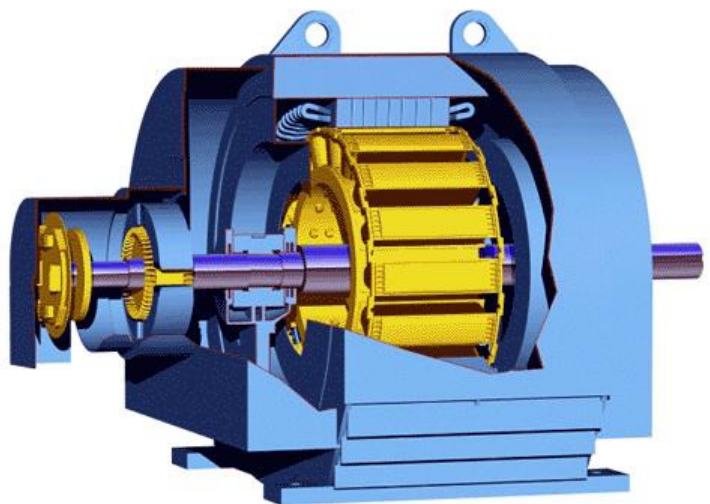


Figura 4.12 – Gerador de Indução

O modelo matemático para regime sinusoidal numa máquina assíncrona trifásica, como rotor em gaiola de esquilo simples e com barras de pequena dimensão radial, ou com rotor bobinado, pode traduzir-se no circuito da figura 4.13 com os seguintes elementos concentrados, por fase, todos referidos ao estator:

R_s = resistência de um enrolamento referida ao estator;

R_r = resistência equivalente de um enrolamento referida ao rotor;

X_{ds} = reactância de dispersão de um enrolamento referida ao estator;

X_{dr} = reactância de dispersão equivalente de um enrolamento referida ao rotor;

X_m = reactância de magnetização;

R_{Fe} = resistência de perdas no núcleo magnético;

s = escorregamento ((vel. síncr. - vel. rotor)/vel. síncr.)

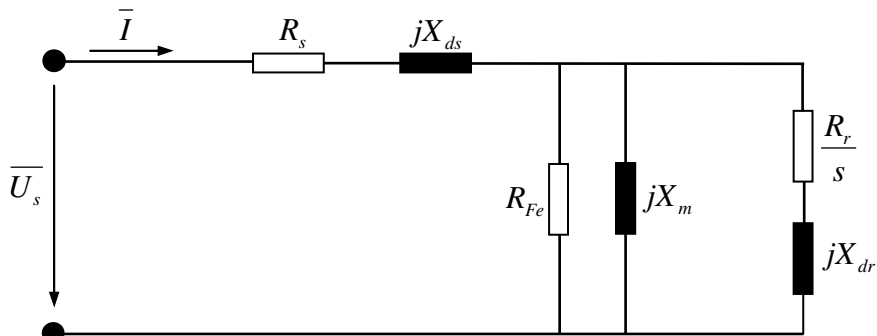


Figura 4.13 – Esquema Equivalente

Podem-se calcular algumas grandezas importantes no funcionamento em regime estacionário com alimentação sinusoidal equilibrada em função do escorregamento e para valores de tensão (U_s) e de frequência (f), e à temperatura de referência:

- Impedância vista da entrada

$$\bar{Z} = \frac{R_{Fe} (R_s + \bar{Z}_{AB})}{R_{Fe} + R_s + \bar{Z}_{AB}}, \quad [4.1]$$

Assim,

$$\bar{Z}_{AB} = \frac{\bar{Z}_e \cdot R_{Fe}}{R_{Fe} - \bar{Z}_e} - R_s, \quad [4.2]$$

Deste modo,

$$\bar{Z}_e : Z_e = U/\sqrt{3}I, \arg\{\bar{Z}_e\} = \arccos \frac{P}{\sqrt{3}UI}, \quad [4.3]$$

- Valor eficaz da corrente à entrada

$$I = \frac{\bar{U}}{\sqrt{3Z}}, \quad [4.4]$$

- Factor de potência

$$\cos \varphi = \frac{\operatorname{Re}\{\bar{Z}\}}{Z}, \quad [4.5]$$

- Potência activa entregue à máquina

$$P = 3 \operatorname{Re}\{\bar{Z}\} I^2, \quad [4.6]$$

(se resultar $P < 0$ a máquina está a funcionar como gerador).

- Potência de perdas de Joule no estator

$$P_{Js} = 3R_s \left| \bar{I} - \frac{\bar{U}}{\sqrt{3}R_{Fe}} \right|^2, \quad [4.7]$$

- Potência de perdas no ferro

$$P_{Fe} = \sqrt{3} \frac{U^2}{R_{Fe}}, \quad [4.8]$$

- Potência entregue ao rotor

$$P_r = P - P_{Js} - P_{Fe}, \quad [4.9]$$

- Potência de perdas de Joule no rotor

$$P_{Jr} = s \cdot P_r, \quad [4.10]$$

- Potência total de perdas

$$P_p = P_{Js} + P_{Fe} + P_{Jr} + P_m, \quad [4.11]$$

onde P_m são as perdas mecânicas.

- Potência mecânica útil

$$P_{mu} = P - P_p, \quad [4.12]$$

(se $P_{mu} < 0$ a máquina está a ser accionada)

- Rendimento

Como motor ($P > 0$ e $P_{mu} > 0$) $\eta = P_{mu} / P,$

Como gerador ($P < 0$ e $P_{mu} < 0$) $\eta = P / P_{mu},$

- Binário mecânico útil

$$T = \frac{U^2}{|R_s + \bar{Z}_{AB}|} \operatorname{Re}\{\bar{Z}_{AB}\}. \quad [4.13]$$

4.2.2 Máquina de Indução Duplamente Alimentada

A máquina de indução considerada é uma máquina trifásica cujo enrolamento no estator é constituído por bobinas alojadas em cavas e que cobrem toda a superfície interior. A bobine pertencente a uma fase é colocada na cava diametralmente oposta, para que a bobinagem seja constituída por três circuitos, correspondente a três fases, desfasados geometricamente de 120°.

Uma vez que a Máquina de Indução Duplamente Alimentada (MIDA) se trata de uma máquina de rotor bobinado, o rotor tem uma constituição análoga à do estator, onde os enrolamentos do rotor estão ligados a anéis metálicos isolados montados sobre o veio e em que a corrente é conduzida ao exterior através de escovas de carbono que deslizam sobre os anéis.

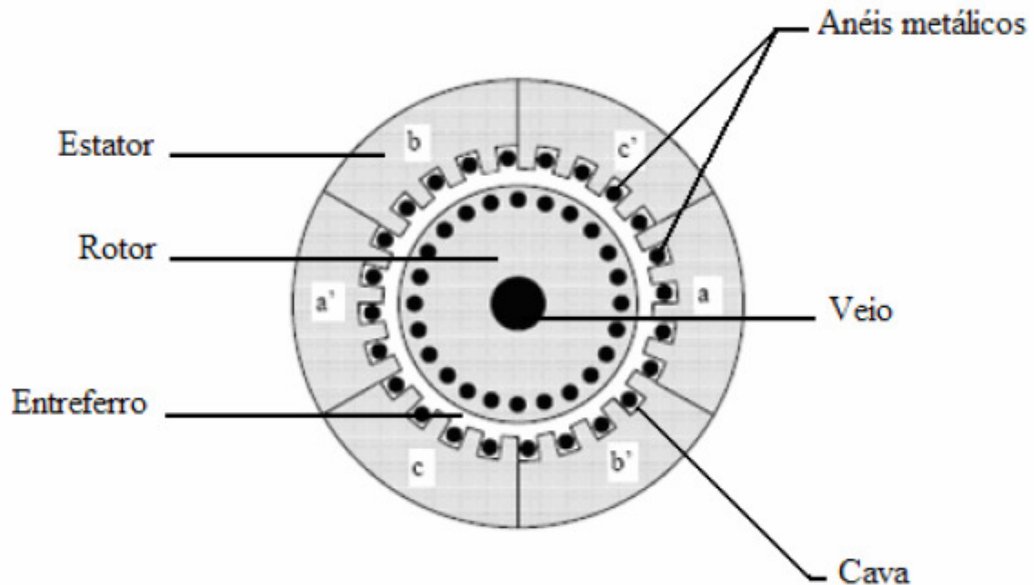


Figura 4.14 – Corte lateral de uma Máquina de Indução [40]

Em ambas as configurações descritas, a disposição dos condutores é feita de modo a que, quando se aplica um sistema trifásico equilibrado, resulte no entreferro, um fluxo magnético girante que induz no enrolamento do rotor uma força electromotriz com forma sinusoidal, que gira com uma

velocidade angular dada por $\frac{\omega_s}{n_{pp}}$, onde n_{pp} representa o número de pares de pólos. Se o rotor girar

a uma velocidade diferente de $\frac{\omega_s}{n_{pp}}$, surgem nos condutores correntes induzidas, que por sua vez

criam um campo girante, produzindo assim um binário electromagnético.

Somente na máquina de rotor bobinado é possível variar a velocidade através da inclusão de resistências exteriores no rotor, o que tem a vantagem de manter o binário máximo acessível à custa da dissipação de energia nas resistências exteriores. Este processo de variação de resistências, para os parâmetros da máquina em estudo, encontra-se representado na Figura 4.15, onde se considera que a tensão aplicada ao estator é de 1 p.u.

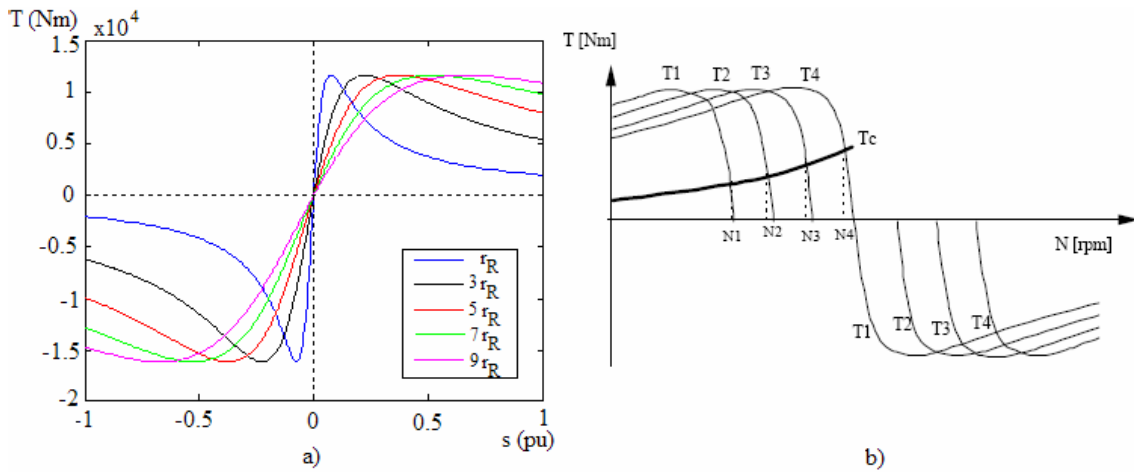


Figura 4.15 – a) Curvas características Binário – Velocidade da máquina de indução, para vários valores de resistência [40]

b) Característica Binário – Velocidade da MIDA [40]

O princípio do funcionamento da MIDA consiste então na recuperação desta energia dissipada, onde no lugar das resistências, encontra-se um conversor de frequência estático ligado ao rotor, uma vez que do ponto de vista da máquina, esta introdução do conversor equivale à introdução de uma resistência. Esta energia é novamente entregue à rede através deste conversor, quase sem perdas, sendo portanto um sistema de elevado rendimento. É este princípio do controlo da velocidade por aproveitamento da energia de escorregamento, que permite que esta máquina funcione como gerador para escorregamentos positivos. Porém, de forma a garantir este modo de operação, torna-se necessário fornecer potência activa ao rotor.

• Vantagens e Desvantagens

As grandes vantagens da utilização deste tipo de máquina são sobretudo:

- O facto da máquina assíncrona ser de construção resistente e sem colectador, bem como de não precisar de ser alimentada por uma máquina de corrente contínua à parte (caso da máquina síncrona), resultando em custos de capital baixos, baixa manutenção, e melhor desempenho transitório.
- Está disponível para potências de vários MW, tal como outras máquinas que apenas dispõem de alguns kW.
- O facto de a máquina poder ser operada a velocidade variável implica que a potência mecânica disponível para conversão em potência eléctrica seja superior, em relação a outras máquinas que operam a velocidade fixa, independentemente de a velocidade do ar ser elevada ou não.
- A possibilidade de funcionar tanto em modo gerador ou em modo motor, seja o escorregamento positivo ou negativo podendo assim funcionar como gerador em três zonas:

na zona abaixo da velocidade de sincronismo, em que é fornecida PA ao rotor da máquina, na zona próxima do sincronismo (onde o transito de PA no rotor da máquina é praticamente nulo) e na zona acima dessa velocidade, em que a máquina fornece PA à rede pelo estator e pelo rotor da máquina.

No que diz respeito às desvantagens, a principal desvantagem prende-se com o facto de a máquina de indução trocar energia reactiva com a rede e logo ser necessário equipamento adicional (baterias de condensadores) de modo a corrigir o factor de potência. Porém, no caso da MIDA e com um controlo adequado, como se explica no capítulo 5,2, é possível controlar e compensar a PR consumida pela máquina, sem ser necessário recorrer aos condensadores.

5. Aplicação do Modelo - Implementação da Central de Coluna de Água Oscilante

Numa Central de Coluna de Água Oscilante (CAO), tal como foi verificado anteriormente, podem-se facilmente destacar dois componentes essenciais: a turbina e o gerador. É do bom funcionamento destes componentes que depende o bom desempenho da Central, e para tal é necessário que estes equipamentos sejam os mais adequados. Seguidamente iremos analisar em pormenor estes componentes, implementados neste trabalho.

5.1 Turbina de Wells

A transferência da “energia da onda” para energia cinética é feita através da turbina. Para isso, e devido às especificidades deste tipo de Central, verificou-se que a implementação de uma Turbina de Wells seria o mais indicado. Deste modo, o conhecimento das características da turbina é importante, pois permite-nos calcular o caudal de ar que a atravessa, assim como a potência que ela transmite ao veio. A turbina está sujeita a uma queda de pressão $p_t = p - p_v$, onde $|p_v|$ é a perda de pressão que se dá na válvula em série (se a válvula está completamente aberta ou não existe $p_v = 0$).

As características da turbina de Wells podem ser escritas na forma adimensional [24].

Assim,

$$\Phi = f_w(\Psi), \quad \Pi = f_p(\Psi),$$

Onde,

$$\Phi = \frac{w_t}{\rho^* N D^3}, \quad \Psi = \frac{p_t}{\rho^* N^2 D^2}, \quad \Pi = \frac{P}{\rho^* N^3 D^5}, \quad [5.1]$$

são, respectivamente, os coeficientes adimensionais de caudal, pressão e potência para uma determinada configuração geométrica. Assim, D é o diâmetro exterior do rotor da turbina, N é a velocidade de rotação expressa em radianos por unidade de tempo, ρ^* é a massa específica de referência (normalmente a massa específica de estagnação à entrada da turbina), w_t e p_t são, respectivamente, o caudal e a diferença de pressão a que a turbina está sujeita e P é a potência fornecida pela turbina.

Admitindo-se que a velocidade de rotação para a turbina, num dado instante, é N , pode-se escrever

$$\frac{w_t}{\rho^*} = ND^3 f_w \left(\frac{p_t}{\rho^* N^2 D^2} \right), \quad [5.2]$$

e

$$P = \rho^* N^3 D^5 f_p \left(\frac{p_t}{\rho^* N^2 D^2} \right). \quad [5.3]$$

É possível concluir, com base em 5.1, que, para uma dada turbina, o caudal volúmico turbinado, $q_t = w_t / \rho^*$, é só função da queda de pressão a que a turbina está sujeita, p_t , da velocidade de rotação, N , e da massa específica de estagnação à entrada da turbina, ρ^* . Como se pode verificar, observando a figura 5.2, o coeficiente adimensional de potência Π , tem um máximo para um dado valor de $|\Psi|$ a que chamaremos Ψ_{cr} . Assim, quando $|\Psi| = \Psi_{cr}$, a potência P tem um valor máximo para uma dada velocidade de rotação N . Convém limitar o valor da queda de pressão a que a turbina está sujeita, impedindo-se que $|p_t|$ exceda o valor crítico, p_{cr} , para o qual se tem $|\Psi| = \Psi_{cr}$. Refira-se que p_{cr} depende da velocidade de rotação, podendo ser obtido por $p_{cr} = \Psi_{cr} \rho^* N^2 D^2$. Se $|p_t| > p_{cr}$, a turbina entra em perda aerodinâmica, isto é, para uma determinada velocidade de rotação a potência P decresce rapidamente com o aumento do módulo da queda de pressão a que a turbina está sujeita, acima do valor de p_{cr} . A utilização de uma válvula em série ou em paralelo com a turbina é uma solução que visa evitar que $|p_t|$ exceda o seu valor crítico e, conseqüentemente, que a turbina entre em perda.

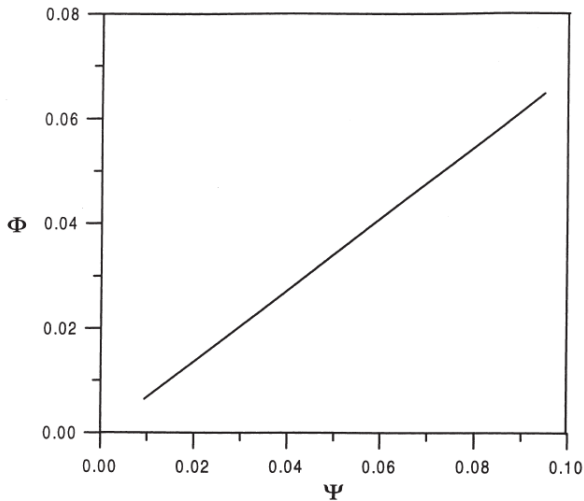


Figura 5.1 – Curva $\Phi = f_w(\Psi)$, coeficiente adimensional de caudal em função do coeficiente adimensional de pressão para a turbina de Wells [24]

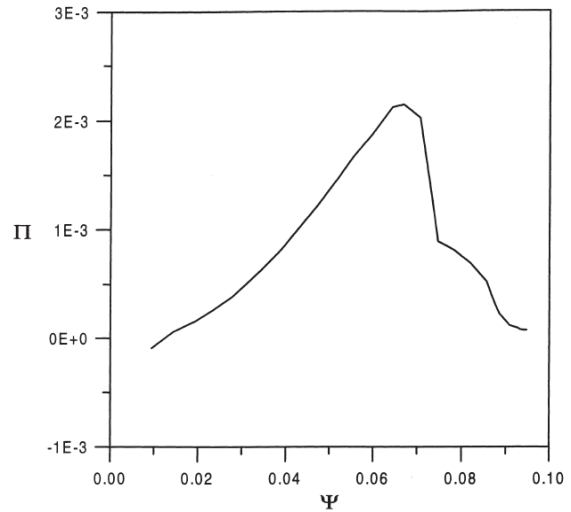


Figura 5.2 – Curva $\Pi = f_p(\Psi)$, coeficiente adimensional de potência em função do coeficiente adimensional de pressão para a turbina de Wells [24]

A variação da pressão na câmara pneumática, como podemos verificar na figura 5.2, induz uma determinada potência no veio. Esta relação é efectuada através da curva de potência da Turbina de Wells, sendo essa potência transferida como dado de entrada no gerador.

5.2 Máquina de Indução Duplamente Alimentada

É no gerador que se transforma a energia cinética, obtida da turbina, em energia eléctrica.

Para este trabalho optou-se pela implementação de uma MIDA, por permitir o controlo da potência reactiva directamente no gerador, sem recorrer a baterias de condensadores.

5.2.1 Regime Permanente

A representação do esquema da máquina de indução, pode ser feita a partir de variadas transformações, obtendo-se assim várias formas de representação, umas mais simples do que outras.

O esquema equivalente de uma máquina de indução, deduzido num referencial síncrono com o campo girante do estator (que gira à velocidade ω_s) e em que os parâmetros do rotor se encontram referidos ao estator, é representado por:

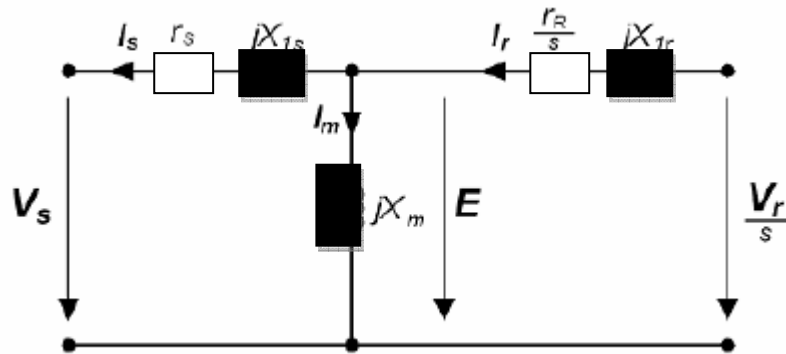


Figura 5.3 – Esquema equivalente da máquina de indução.

As perdas do ferro foram consideradas desprezáveis.

A partir da Figura 5.3 é possível estabelecer as quatro equações genéricas que regem o comportamento da MIDA em regime estacionário:

$$\bar{V}_S = -(r_S + jX_{1S}).I_S + E \quad [5.4]$$

$$\frac{\bar{V}_R}{S} = \left(\frac{r_R}{S} + jX_{1R} \right).I_R + E \quad [5.5]$$

$$E = jX_m I_m \quad [5.6]$$

$$s = \frac{\omega_S - \omega_R}{\omega_S} \quad [5.7]$$

Onde:

\bar{V}_S = Tensão reduzida ao estator

r_S = Resistência estatórica

X_{1S} = Reactância estatórica

I_S = Corrente estatórica

s = Escorregamento

\overline{V}_R = Tensão reduzida ao rotor

r_R = Resistência rotórica

X_{1R} = Reactância rotórica

I_R = Corrente rotórica

E = Força electromotriz

X_m = Reactância de magnetização

I_m = Corrente de magnetização

ω_s = Velocidade estatórica

ω_R = Velocidade rotórica

Circulando nas malhas, é possível ainda exprimir as seguintes equações:

$$V_S = -(r_S + jX_{1S}) \cdot I_S + jX_m I_m \quad [5.8]$$

$$\frac{V_R}{S} = \left(\frac{r_R}{S} + jX_{1R} \right) \cdot I_R + jX_m I_m \quad [5.9]$$

Onde

$$X_S = X_{1S} + X_m \quad \text{e} \quad X_R = X_{1R} + X_m \quad [5.10]$$

É possível analisar o comportamento da máquina em termos de trânsito de potência reescrevendo as equações da tensão no estator e da força electromotriz, sabendo a definição de potência activa, **P = real (VI)**, e de potência reactiva, **Q = imag (VI)**, e por fim multiplicando por I_s . Obtêm-se assim as equações de potência activa (P_s) e reactiva (Q_s) transferidas no estator, com as equações de

potência activa $\left(\frac{P_R}{S} \right)$ e reactiva $\left(\frac{Q_R}{S} \right)$ transferidas no rotor. Assim,

$$P_S = -r_S |I_S|^2 + \text{real}(EI_S) \quad [5.11]$$

$$Q_S = -X_{1S} |I_S|^2 + \text{imag}(EI_S) \quad [5.12]$$

$$\frac{P_R}{S} = \frac{r_R}{S} |I_R|^2 + \text{real}(EI_S) \quad [5.13]$$

$$\frac{Q_R}{S} = X_{1R} |I_R|^2 + X_m |I_m|^2 + \text{imag}(EI_S) \quad [5.14]$$

Onde $\text{real}(EI_S) = P_{ag}$ e $\text{imag}(EI_S) = Q_{ag}$, são as potências activas e reactivas que transitam no entreferro.

A equação do balanço de potência activa no rotor da máquina conduz a:

$$P_{ag} = P_R - r_R |I_R|^2 + P_{mec} \quad [5.15]$$

Onde P_{mec} é a potência mecânica transferida a partir do rotor da máquina proveniente da turbina (positiva no modo de funcionamento como gerador, negativa no modo de funcionamento como motor).

Obtém-se a seguinte equação:

$$P_{mec} = (1 - s).P_{ag} \quad [5.16]$$

Equação que permite analisar o trânsito de potência que circula pela máquina.

A Tabela que se segue, ilustra os diferentes e possíveis modos de funcionamento para a MIDA, tanto para escorregamentos positivos como negativos, bem como os modos de funcionamento da Máquina de Indução de Rotor em Gaiola de Esquilo e a Figura 5.4 ilustra o trânsito de potências no sistema quando a máquina está a funcionar como gerador.

	Gaiola de Esquilo			Dupla Alimentação			
	P_{ag} (eq.1.9)	P_{mec} (eq.1.11)	Funcionamento	P'_R	P_{ag} (eq.1.9)	P_{mec} (eq.1.11)	Funcionamento
$s > 0$	< 0	< 0	Motor	> 0	< 0 se $P'_R < r'_R I'_R ^2$	< 0	Motor
				< 0	> 0 se $P'_R > r'_R I'_R ^2$	> 0	Gerador
				< 0	< 0	< 0	Motor
$s < 0$	> 0	> 0	Gerador	> 0	< 0 se $P'_R > r'_R I'_R ^2$	< 0	Motor
				> 0	> 0 se $P'_R < r'_R I'_R ^2$	> 0	Gerador
				< 0	> 0	> 0	Gerador

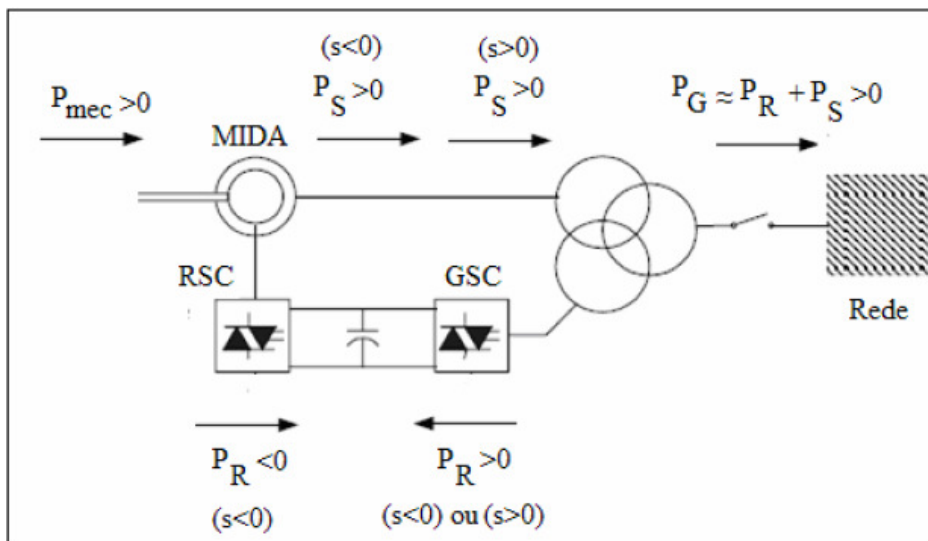


Tabela 5.1 – Modos de funcionamento das Máquinas de Indução de Rotor em Gaiola de Esquilo e Duplamente Alimentadas [7]

Figura 5.4 – Trânsito de potência quando a máquina está a funcionar como gerador [7]

Este estudo em regime permanente é necessário porque é a partir das equações em regime permanente que se obtêm as condições iniciais em regime transitório.

5.2.2 Regime Transitório

O estudo do regime transitório é necessário para analisar o comportamento do gerador e obter os dados à saída deste, que serão injectados na rede. São estes dados que serão alvo da análise em termos de qualidade de energia. Será também importante o seu estudo para se proceder à análise de controlo dos conversores electrónicos.

As equações que traduzem o comportamento transitório das máquinas de indução:

$$v_{Sr} = -r_S i_{Sr} - \omega_S \lambda_{Si} + \frac{d}{dt} \lambda_{Sr} \quad [5.17]$$

$$v_{Si} = -r_S i_{Si} - \omega_S \lambda_{Sr} + \frac{d}{dt} \lambda_{Si} \quad [5.18]$$

$$v_{Rr} = r_R i_{Rr} - \left(\frac{\omega_S - \omega_R}{\omega_S} \right) \lambda_{Ri} + \frac{1}{\omega_S} \frac{d}{dt} \lambda_{Rr} \quad [5.19]$$

$$v_{Ri} = r_R i_{Ri} + \left(\frac{\omega_S - \omega_R}{\omega_S} \right) \lambda_{Rr} + \frac{1}{\omega_S} \frac{d}{dt} \lambda_{Ri} \quad [5.20]$$

$$\lambda_{Sr} = -L_S i_{Sr} + M i_{Rr} \quad [5.21]$$

$$\lambda_{Si} = -L_S i_{Si} + M i_{Ri} \quad [5.22]$$

$$\lambda_{Rr} = L_R i_{Rr} - M i_{Sr} \quad [5.23]$$

$$\lambda_{Ri} = L_R i_{Ri} - M i_{Si} \quad [5.24]$$

Onde:

v_{Sr} = Parte real da tensão no estator

v_{Si} = Parte imaginária da tensão no estator

v_{Rr} = Parte real da tensão no rotor

v_{Ri} = Parte imaginária da tensão no rotor

i_{Sr} = Parte real da corrente estatórica

i_{Si} = Parte imaginária da corrente estatórica

i_{Rr} = Parte real da corrente rotórica

i_{Ri} = Parte imaginária da corrente rotórica

λ_{Sr} = Parte real do fluxo estatórica

λ_{Si} = Parte imaginária do fluxo estatórico

λ_{Rr} = Parte real do fluxo rotórico

λ_{Ri} = Parte imaginária do fluxo rotórico

M = Indutância de magnetização

L_S = Indutância estatórica

L_R = Indutância rotórica

Para que seja possível estudar o comportamento da máquina em regime transitório, é necessário desenvolver as equações que compõem o modelo. Da dedução destas equações obtêm-se as seguintes equações que traduzem o comportamento transitório da máquina:

$$v_{Sr} = -r_S i_{Sr} + L_{eq} i_{Si} - \frac{M}{L_R} \lambda_{Ri} \quad [5.25]$$

$$v_{Si} = -r_S i_{Si} - L_{eq} i_{Sr} + \frac{M}{L_R} \lambda_{Rr} \quad [5.26]$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{Rr} = \omega_S v_{Rr} - \frac{1}{T_0} (\omega_S \lambda_{Rr} + \omega_S M i_{Sr}) + s \omega_S \lambda_{Ri} \quad [5.27]$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{Ri} = \omega_S v_{Ri} - \frac{1}{T_0} (\omega_S \lambda_{Ri} + \omega_S M i_{Si}) - s \omega_S \lambda_{Rr} \quad [5.28]$$

Onde, $L_{eq} = L_S - M$ e $T_0 = \frac{L_R}{r_R}$ [5.29]

A descrição do modelo da máquina de indução fica completa com a equação mecânica, expressa em p.u.:

$$\frac{d\omega_R}{dt} = \frac{1}{J} (\Gamma_{mec} - \Gamma_{em}) \quad [5.30]$$

Onde, $J = \frac{2n_{pp}H}{\omega_S}$ [5,31] que representa o momento de inércia da máquina

n_{pp} - Número de pares de polos

H - Constante de inércia da máquina de indução

e

Γ_{mec} = Binário mecânico

Γ_{em} = Binário electromagnético, dado pela fórmula:

$$\Gamma_{em} = \frac{M}{L_R} (\lambda_{Rr} i_{Si} - \lambda_{Ri} i_{Sr}) \quad [5.32]$$

• Modelo de 3ª Ordem

Das anteriores, obtêm-se as seguintes equações: (modelo de 3ª ordem da Máquina de Indução Duplamente Alimentada implementadas)

$$\frac{d\lambda_{rr}}{dt} = \lambda_{rr} \times \left(-\frac{\omega_s}{T_0} - \frac{A_1 \cdot X_{eq} \cdot M}{X_r \cdot R_s^2} \right) + \lambda_{ri} \times \left(\frac{A_1 \cdot M}{X_r \cdot R_s} + s \cdot \omega_s \right) + \omega_s \cdot v_{rr} + \frac{A_1 \cdot X_{eq}}{R_s^2} \cdot v_{si} + \frac{A_1}{R_s} \cdot v_{sr} \quad [5.33]$$

$$\frac{d\lambda_{ri}}{dt} = \lambda_{ri} \times \left(-\frac{\omega_s}{T_0} - \frac{A_1 \cdot X_{eq} \cdot M}{X_r \cdot R_s^2} \right) + \lambda_{rr} \times \left(-\frac{A_1 \cdot M}{X_r \cdot R_s} - s \cdot \omega_s \right) + \omega_s \cdot v_{ri} - \frac{A_1 \cdot X_{eq}}{R_s^2} \cdot v_{sr} + \frac{A_1}{R_s} \cdot v_{si} \quad [5.34]$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_{mec} - A_2}{J} \times \left[\lambda_{rr}^2 \cdot \left(\frac{M}{X_r \cdot R_s} \right) + \lambda_{ri}^2 \cdot \left(\frac{M}{X_r \cdot R_s} \right) + \lambda_{rr} \cdot \left(\frac{X_{eq}}{R_s^2} \cdot v_{sr} - \frac{v_{si}}{R_s} \right) + \lambda_{ri} \cdot \left(\frac{X_{eq}}{R_s^2} \cdot v_{si} + \frac{v_{sr}}{R_s} \right) \right] \quad [5.35]$$

$$\text{Em que: } A_1 = \frac{\omega_s \cdot M}{T_0 \cdot \left(1 + \frac{X_{eq}^2}{R_s^2} \right)}, \quad A_2 = \frac{M}{X_r \cdot \left(1 + \frac{X_{eq}^2}{R_s^2} \right)}, \quad s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad [5.36]$$

5.3 Conversor estático duplo

O conversor estático duplo implementado é constituído por um circuito intermediário em tensão contínua que interliga dois conversores: o conversor do lado do rotor (RSC), e o conversor do lado da rede (GSC). Os dois conversores são idênticos e compostos por uma ponte trifásica equipada com 6 IGBT's, cada um deles com um diodo em anti-paralelo. Os diodos têm como função garantir a bidireccionalidade da corrente, ou seja, permitir a circulação da corrente, quando o IGBT ao qual está

associado, não estiver a conduzir. Este conversor e os dispositivos electrónicos que o constituem são a parte mais sensível de todo o modelo, quando sujeitos a um regime transitório.

O conversor do lado da rede, que está ligado ao um transformador elevador, controla a amplitude da tensão contínua aos terminais do condensador (de forma a ser possível o controlo eficaz da tensão do rotor), controla a frequência da onda alternada de tensão de forma que esta seja igual á frequência da rede e controla a fase da onda alternada, o que permite impor aos terminais AC do conversor um determinado factor de potência. Esta propriedade de ajustar a fase da onda de tensão/intensidade de corrente, permite dispensar a utilização de baterias de condensadores na grande maioria dos casos [1]. Entre este conversor e o transformador existe ainda um filtro RLC representado na Figura 5.5 por Z_L .

O conversor do lado do rotor, que está directamente ligado ao rotor da MIDA, além de permitir o controlo do módulo e argumento da intensidade de tensão do rotor, permite controlar a velocidade de rotação do rotor.

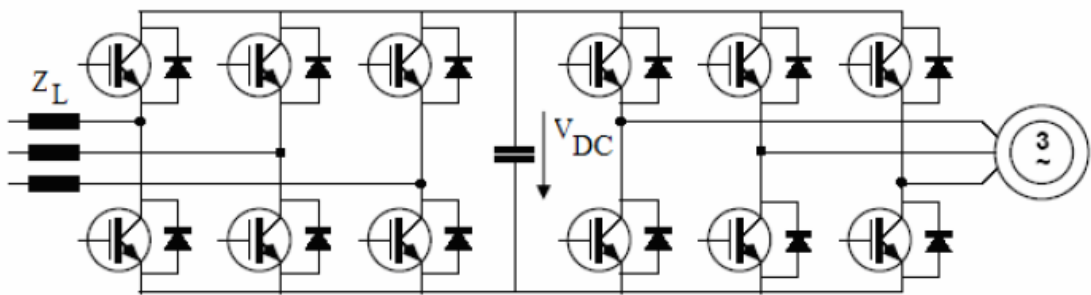


Figura 5.5 – Conversor estático duplo [41]

5.3.1 Integração do modelo à Rede Eléctrica

A integração deste modelo na rede é feita a partir de um transformador trifásico de três enrolamentos e de um circuito RLC.

Este tipo de transformador é composto por três enrolamentos instalados em torno do mesmo núcleo (Figura 5.6), e vai assim permitir que a rede forneça através do primário duas tensões secundárias (uma aplicada directamente ao estator, e outra aplicada indirectamente ao rotor, através do conversor).

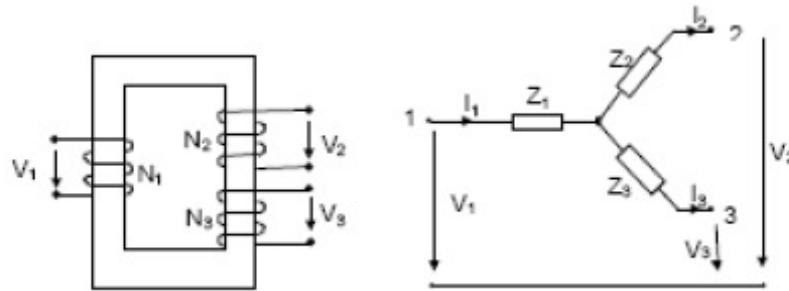


Figura 5.6 – Transformador com três enrolamentos (extraído de [53])

Existem três impedâncias (tensões) de curto-circuito, correspondentes ao número de combinações dois a dois, dos três enrolamentos e que são obtida a partir de três ensaios de curto-circuito, obtendo-se então:

$$\begin{cases} Z_{12} = Z_1 + Z_2 \\ Z_{13} = Z_1 + Z_3 \\ Z_{23} = Z_2 + Z_3 \end{cases} \quad [5.37]$$

Uma vez que a resistência dos enrolamentos é geralmente muito menor que a reactância, as impedâncias do transformador são apenas modeladas pelas reactâncias de curto-circuito.

Resolvendo o sistema de três equações e três incógnitas obtém-se Z_1 , Z_2 e Z_3 :

$$Z_1 = \frac{Z_{12} + Z_{13} - Z_{23}}{2} \quad [5.38]$$

$$Z_2 = \frac{Z_{12} + Z_{23} - Z_{13}}{2} \quad [5.39]$$

$$Z_3 = \frac{Z_{13} + Z_{23} - Z_{12}}{2} \quad [5.40]$$

O circuito RLC, que interliga o terciário do transformador com o conversor do lado da rede, tem como função atenuar as harmónicas de tensão e de corrente que por ele circulam (a corrente para limitar as harmónicas de tensão e a capacidade para atenuar as componentes parasitas da indutância).

A Figura 5.7 mostra então, mais pormenorizadamente, o sistema global desenvolvido e implementado.

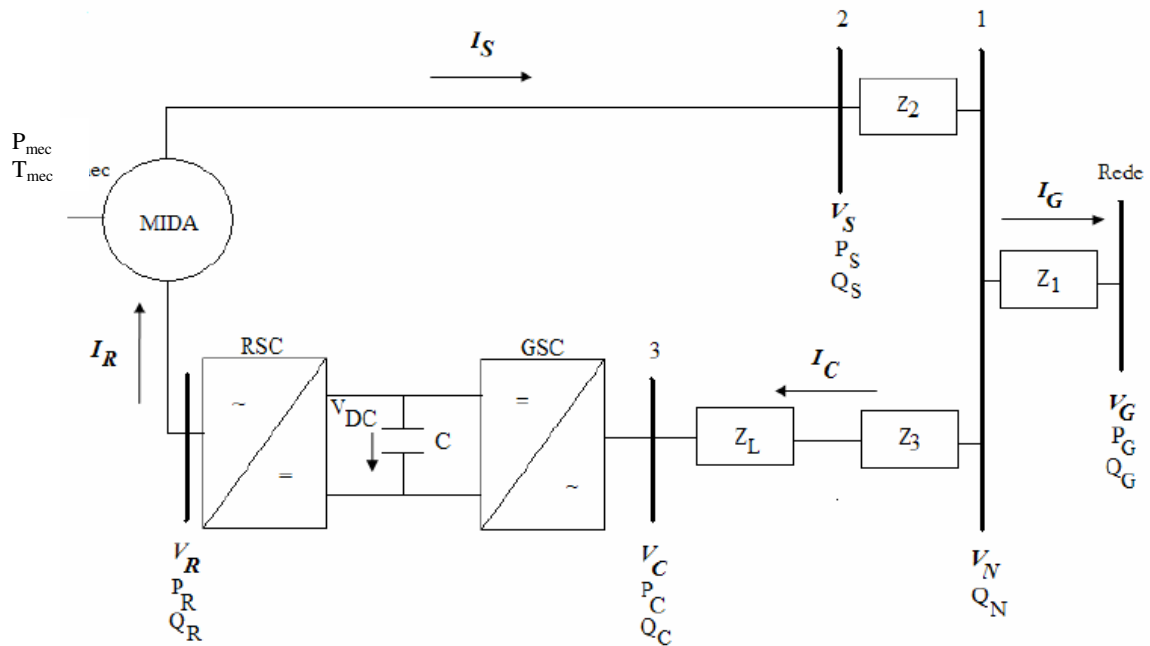


Figura 5.7 – Esquema do modelo da MIDA [7]

5.3.2 Controlo Vectorial

Há poucos anos, pensar no accionamento de Máquinas Eléctricas que tivesse rápida resposta ao controlo de binário, principalmente nos transitórios, implicava uma associação à Máquina de Corrente Contínua, que pelas suas características construtivas, apresenta capacidade de manter fluxo de excitação e corrente da armadura desfasados no espaço, em 90°, situação que propicia máximo binário.

O fluxo da máquina, que não depende da corrente da armadura, é directamente proporcional à corrente de excitação, que normalmente é mantida no seu valor nominal, ou dependendo da aplicação, varia de forma controlada e suave.

O binário por sua vez, é proporcional ao produto vectorial do fluxo pela corrente da armadura. Como estas variáveis são espacialmente ortogonais, a multiplicação torna-se num escalar e o binário produzido é máximo, transferindo ao accionamento de precisão de controlo da velocidade, mesmo durante variação de carga; rápido controlo de aceleração e desaceleração e grande estabilidade do sistema.

Os avanços na tecnologia digital permitiram a obtenção de um controlo dinâmico rápido e eficaz para a máquina de indução, facultando resultados tão bons como os de uma máquina de corrente contínua. Em termos de não linearidade, a máquina de indução apresenta características mais não lineares e fortemente acopladas relativamente à MCC. O controlo vectorial possibilita assim à máquina de indução, comportar-se como a MCC.

No controlo vectorial, um vector é transformado a partir de um eixo dq para um outro, de referência, passando o vector a girar sincronamente com o eixo de referência escolhido. Assim, após a escolha deste eixo, as tensões e correntes medidas transformadas para o eixo dq de referência, são decompostas em duas componentes distintas: uma sobre o eixo d (directo), e outra sobre o eixo q (quadratura), ortogonais entre si. Desta forma, esta técnica possibilita simplificar a modelação dos algoritmos de controlo.

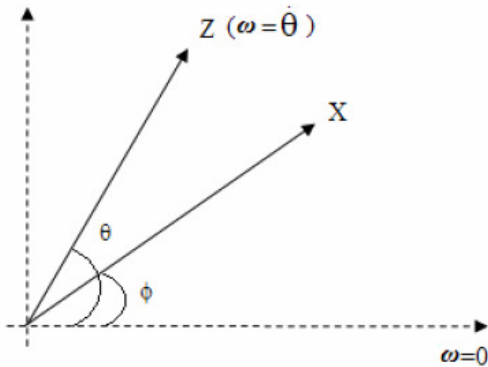


Figura 5.8 – Controlo Vectorial [49]

Um vector X orientado pelo referencial Z , X^Z , é transformado para o eixo dq orientado segundo o vector Z da seguinte forma:

$$\begin{aligned} X^Z &= |X| e^{j\phi} e^{-j\theta} \\ \Leftrightarrow X^Z &= |X| e^{j(\phi-\theta)} \\ \Leftrightarrow X^Z &= X^Z_d + jX^Z_q \end{aligned} \quad [5.41]$$

Existem diferentes abordagens em relação ao eixo de referência: (i) orientado pelo fluxo do estator [31], [32], [35] e [37] (ii) orientado pelo fluxo no entreferro [38] e [44] (iii) orientado pela tensão do estator [45] e [47]. Este deve ser escolhido de acordo com as vantagens que possam trazer para o problema em estudo. Neste trabalho, optou-se por adoptar um eixo dq orientado pelo vector da tensão do estator (ROTE).

5.3.3 Modulação por largura de impulso (Pulso Width Modulation - PWM)

A comutação dos IGBT's é realizada por um sistema de comando baseado na modulação por largura de impulsos e assim o controlador estático duplo vai conter dois sistemas de comando PWM independentes: um para o RSC e outro para o GSC.

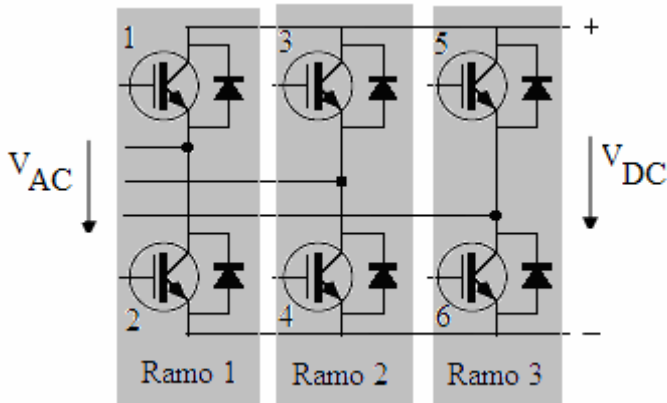


Figura 5.9 – Ponte Inversora [54]

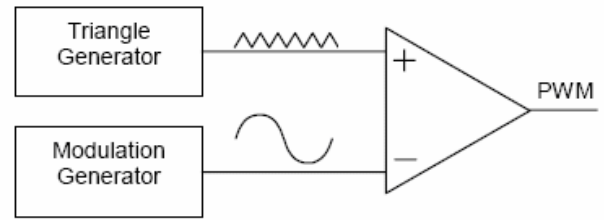


Figura 5.10 – Gerador de sinais PWM [54]

Para cada ramo, representado na Figura 5.9, os impulsos de comando, para a comutação dos dispositivos semicondutores, são gerados através de um comparador, que tem como entradas uma onda triangular e uma onda sinusoidal (Figura 5.10).

5.4 Sistema de Controlo

O módulo e argumento das tensões alternadas V_R e V_C aos terminais dos conversores RSC e GSC respectivamente, a amplitude das harmónicas injectadas, o factor de potência, e o rendimento do sistema através do aproveitamento da velocidade das correntes de ar provocadas pela ondulação, dependem do sistema de controlo aplicado aos conversores.

O controlo implementado vai permitir uma resposta dinâmica rápida às variações da ondulação, possibilitando simultaneamente o controlo da PA e PR. O sistema de controlo vai então permitir a MIDA de obter um rendimento energético máximo, garantido ao mesmo tempo a sua estabilidade. De seguida procura-se esclarecer como tal é conseguido pela actuação do sistema de controlo, em cada um dos conversores, introduzindo-se os modelos desenvolvidos e utilizados.

5.4.1 Conversor do lado do Rotor (RSC)

Ao variar a tensão do rotor, V_R , através do RSC é possível controlar a velocidade do rotor e a potência reactiva injectada/consumida pelo gerador.

Para o controlo vectorial deste conversor, adoptou-se como eixo de referência, o eixo dq orientado pela tensão do estator, denominado como ROTE. Uma vez escolhido este referencial, a

componente directa da tensão, v_{sd} , é igual a $|V_s|$ e a componente em quadratura da tensão, v_{sq} , é nula. A transformação do ROTE é feita multiplicando as grandezas da máquina por $e^{-j\theta_s}$, i.e., multiplicando tanto a parte real como a imaginária destas grandezas por uma matriz T, dada por:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \sin \theta_s \\ -\sin \theta_s & \cos \theta_s \end{bmatrix} \quad [5.42]$$

em que θ_s é o ângulo da tensão no estator, V_s , obtendo-se assim as componentes directa e em quadratura. Como exemplo desta transformação, as componentes d e q de V_R são dadas por:

$$\begin{bmatrix} V_{Rd} \\ V_{Rq} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} V_{Rr} \\ V_{Ri} \end{bmatrix} \quad [5.43]$$

A utilização do ROTE possui diversas vantagens: (i) pelo facto da tensão do estator estar directamente relacionada com a tensão da rede, permite calcular facilmente V_s durante a simulação, (ii) possibilita o desacoplamento da potência activa e reactiva, permitindo assim um controlo fácil e independente destas potências. como se demonstra de seguida. Transformando as equações correspondentes ao regime transitório da máquina pelo ROTE, obtém-se:

$$v_{sd} = -r_s i_{sd} - \omega_s \lambda_{sq} + \frac{d\lambda_{sd}}{dt} \quad [5.44]$$

$$v_{sq} = -r_s i_{sq} - \omega_s \lambda_{sd} + \frac{d\lambda_{sq}}{dt} = 0 \quad [5.45]$$

$$P_s = \text{real}(V_s I_s^*) = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} = v_{sd} i_{sd} \quad [5.46]$$

$$Q_s = \text{imag}(V_s I_s^*) = -v_{sd} i_{sq} + v_{sq} i_{sd} = -v_{sd} i_{sq} \quad [5.47]$$

Desprezando o regime transitório do fluxo do estator, λ_s [74], tem-se que $\lambda_{sd} = 0$.

Sabendo que, $r_s \ll \omega_s (L_s + L_m)$, então:

$$\lambda_{sd} = -L_s i_{sd} + M i_{rd} \Leftrightarrow i_{sd} = \frac{M}{L_s} i_{rd} \quad [5.48]$$

$$\lambda_{sq} = -\frac{v_{sd}}{\omega_s} \quad [5.49]$$

Sabe-se também que:

$$\lambda_{Sq} = -L_S i_{Sq} + M i_{Rq} \Leftrightarrow i_{Sq} = \frac{M i_{Rq} - \lambda_{Sq}}{L_S} \quad [5.50]$$

Assim,

$$i_{Sq} = \frac{M i_{Rq} + \frac{v_{Sd}}{\omega_S}}{L_S} \quad [5.51]$$

Finalmente, substituindo nas equações de P_S e Q_S obtém-se:

$$P_S = v_{Sd} i_{Sd} = v_{Sd} \frac{M}{L_S} i_{Rd} \quad [5.52]$$

$$Q_S = -v_{Sd} \frac{M i_{Rq} + \frac{v_{Sd}}{\omega_S}}{L_S} \quad [5.53]$$

O RSC permite o controlo da velocidade do rotor. Provando analiticamente a afirmação anterior:

Sabe-se que,

$$\Gamma_{em} = \frac{M}{L_R} (E_d i_{Sd} + E_q i_{Sq}) \quad [5.54]$$

E que,

$$\lambda_{Rd} = L_R i_{Rd} - M i_{Sd} \quad [5.55]$$

$$\lambda_{Rq} = L_R i_{Rq} - M i_{Sq} \quad [5.56]$$

A partir das equações do Anexo A, e aplicando-se a transformação ROTÉ obtém-se:

$$\begin{cases} E_r = -\omega_S \lambda_{Ri} \\ E_i = \omega_S \lambda_{Rr} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} E_d = -\omega_S \lambda_{Rq} \\ E_q = \omega_S \lambda_{Rd} \end{cases} \quad [5.57]$$

Substituindo na equação do binário obtém-se:

$$\Gamma_{em} = \frac{M}{L_R} (-\omega_S (L_R i_{Rq} - M i_{Sq}) i_{Sd} + \omega_S (L_R i_{Rd} - M i_{Sd}) i_{Sq}) \quad [5.58]$$

Substituindo as correntes do estator vem:

$$\Gamma_{em} = \frac{M}{L_S} v_{Sd} i_{Rd} \quad [5.59]$$

Conclui-se que é a componente directa da corrente do rotor, i_{Rd} , que vai regular o binário electromagnético, Γ_{em} , que por sua vez regula a velocidade do rotor. Destaca-se o facto de P_S e Q_S dependerem de i_{Rd} e i_{Rq} , justificando o utilização do controlador PQ e do controlador de corrente implementados.

Os ganhos do controlador foram obtidos por tentativa e erro até obter resultados aceitáveis, sendo as constantes: $K_P = K_Q = 1$, $T_P = T_Q = 0,1$, $K_d = K_q = 0,2$, $T_d = T_q = 0,01$.

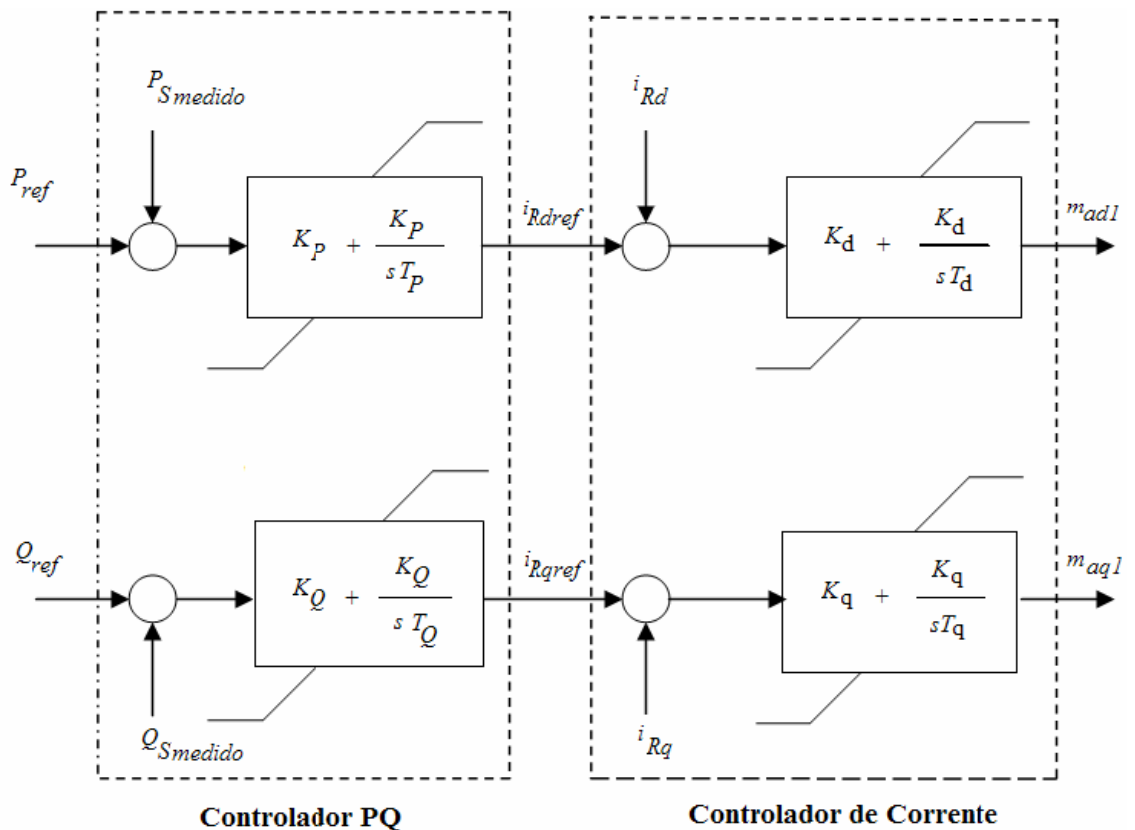


Figura 5.11 – Modelo do RSC [23]

O RSC é controlado por dois andares de controladores PI. O primeiro andar consiste num controlador de corrente, com ganhos K_d e K_q e com constantes de tempo T_d e T_q de igual e baixo

valor, possibilitando uma rápida regulação das correntes do rotor da máquina, para um valor de referência que é determinado por um controlador de potência (controlador PQ) mais lento [23].

Os controladores PI do segundo andar têm ganhos K_P e K_Q e com constantes de tempo T_P e T_Q .

As correntes i_{Rd} e i_{Rq} de entrada são obtidas através de um medidor de corrente, que, tal como o nome indica, mede as correntes no rotor do gerador:

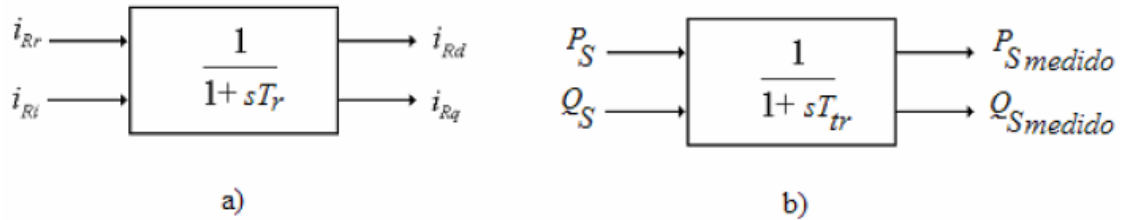


Figura 5.12 – a)Medidor de corrente e b)Medidor de potência do RSC [23]

Medidor de Corrente

O bloco medidor de corrente mede as correntes no rotor da máquina e transforma-as para o ROTE. Além desta propriedade, este bloco mede a amplitude da corrente do rotor em kA e envia o seu valor para o modelo da protecção (conferir capítulo 4). Este bloco introduz ainda um atraso representado pela constante de tempo, T_r .

Controlador de Corrente

Enquanto a componente d é utilizada pelo controlador de corrente para o controlo do binário electromagnético e de P_S , a componente q tem influência sobre a Potência Reactiva.

O bloco controlador de corrente é composto por dois controladores proporcional integral (PI), um para a componente d, e outro para a componente q. A utilização deste tipo de controlador tem como objectivo obter um erro estático nulo. A saída de cada um destes controladores define um factor de modulação, obtendo-se então à saída do controlador PI do eixo d, m_{ad1} e à saída do controlador PI da componente do eixo q, m_{aq1} , sendo $m_{a1} = m_{ad1} + jm_{aq1}$. Os índices de modulação são limitados a um valor máximo e mínimo de modo a que o conversor não sature e limite as harmónicas.

Controlador PQ

O controlador PQ é semelhante ao controlador de corrente do rotor, pois a potência activa e reactiva do estator também são reguladas por dois controladores PI independentes. O valor medido da potencia activa e reactiva de entrada, $P_{Smedido}$ e $Q_{Smedido}$, são efectuadas no estator através do bloco medidor de potência, mas com uma constante de tempo T_{tr} . Como se pode ver pela Figura 5.12 as componentes d e q da corrente do rotor são controladas por valores de referência, i_{Rdref} e i_{Rqref} , determinados pelos controladores de potência activa e reactiva respectivamente. Tal como para o controlador de corrente, o valor de saída destes controladores PI está limitado a um valor máximo e mínimo.

A nível de programação, é utilizado o método de integração trapezoidal. Este método de integração é dado por:

$$\int_0^t e(t)dt = \sum_{j=0}^{j=n} e(j) = \sum_{j=0}^{j=n} \left[\frac{e(n-1) + e(n)}{2} \right] \Delta t \quad [5.60]$$

Onde,

Δt = Passo do Integral

$e(n-1)$ = Valor de entrada anterior

$e(n)$ = Valor de entrada actual

5.4.2 Conversor do lado do Rede (GSC)

Em algumas pesquisas científicas relacionadas com a estabilidade da MIDA perante a ocorrência dum regime transitório, apenas o modelo do conversor do rotor é representado [5]. Neste trabalho, porém, implementa-se também o modelo do conversor do estator, para que seja possível observar o desempenho do sistema, quando este é composto apenas pelo RSC ou por ambos os conversores.

O conversor do lado da rede, GSC, permite controlar a Potência Reactiva, tal como o RSC, e manter constante a tensão aos terminais do condensador do circuito de corrente contínua, V_{DC} . Para além deste facto, é este conversor que possibilita o trânsito da Potência Activa fornecida/consumida pelo rotor para/de a rede. A escolha do eixo dq de referência para o controlo vectorial do GSC pode ser arbitrária, uma vez que a sua escolha não vai influenciar o comportamento deste conversor desde que todas as grandezas estejam referidas ao mesmo referencial adoptado [23]. Assim, escolhe-se o mesmo referencial adoptado para o RSC, o ROTE.

Os ganhos do controlador são os seguintes: $KV_{dc} = 5$, $TV_{dc} = 0,1$, $KC_d = 1$, $KC_q = 3$, $TC_d = TC_q = 0,015$.

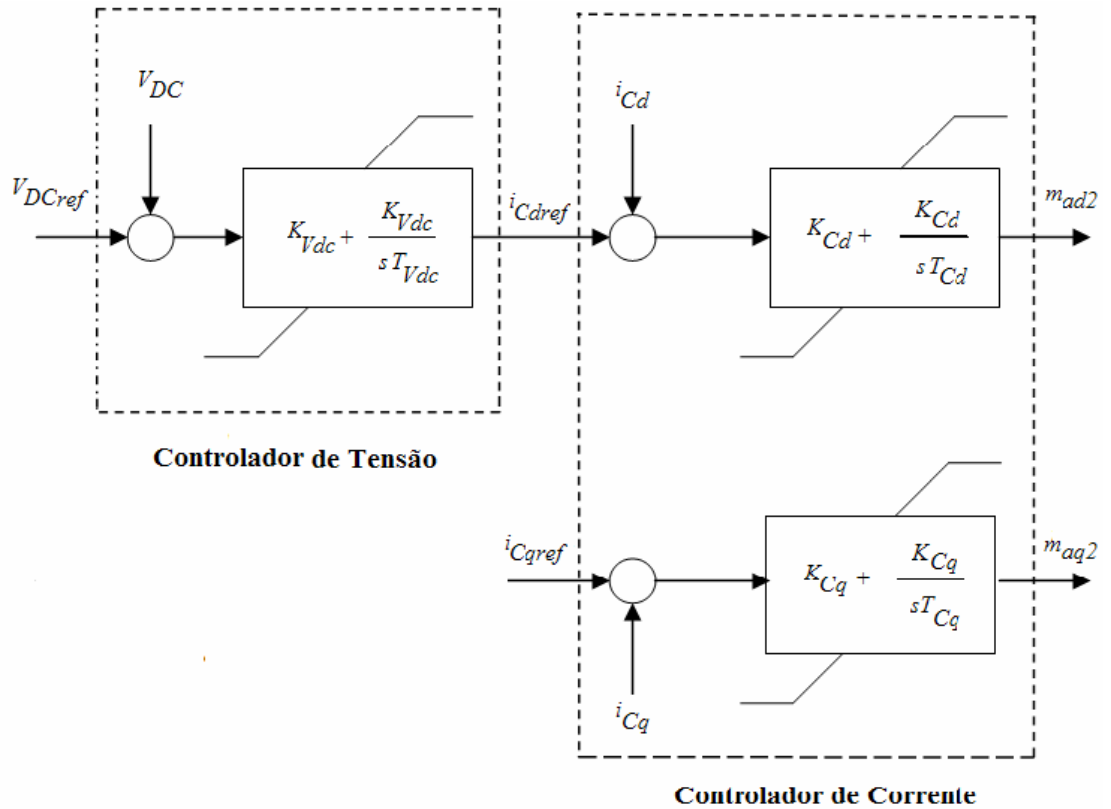


Figura 5.13 – Modelo do GSC [23]

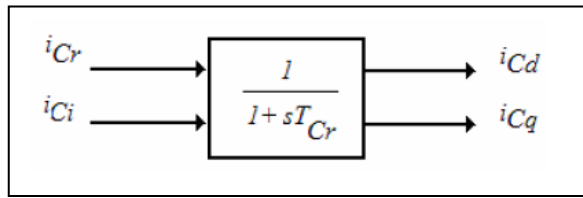


Figura 5.14 – Medidor de corrente do GSC [23]

Como se pode observar pela Figura 5.13 e Figura 5.14, a representação deste modelo é semelhante ao do RSC. Como o funcionamento do controlador e medidor de corrente é idêntico ao já descrito para o RSC, de seguida descreve-se apenas o controlador de tensão.

Controlador de Tensão

O controlador PI que constitui o bloco do controlador de tensão tem como função regular a tensão V_{DC} para o seu valor de referência, V_{DCref} e determinar o valor de referência para a componente no eixo d da corrente que circula entre o conversor do lado da rede e o terciário do

transformador, i_{Cref} . A constante de tempo, T_{Vdc} , e o ganho, K_{Vdc} , deste controlador são especificados de acordo com o valor do condensador do circuito de tensão contínua [15].

Uma variação de V_{DC} influencia o comportamento de RSC, obrigando o controlador GSC a ter de actuar rapidamente.

Este conversor foi implementado de forma idêntica a RSC, em que as funções de transferência das Figuras 5.13 e 5.14 são modeladas em ordem ao tempo, obtendo-se à saída do controlador PI do eixo d, m_{ad2} e à saída do controlador PI do eixo q, m_{aq2} .

5.4.3 Controlo de Potência Reactiva

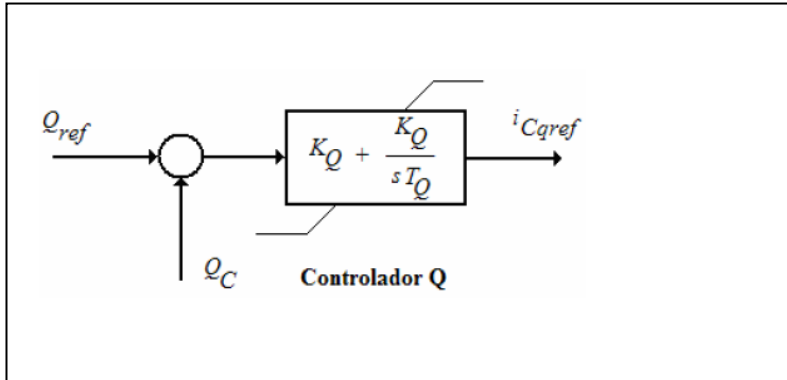
Os sistemas de potência eléctrica têm que ser desenhados para que a tensão de todo os nós da uma rede sejam mantidos dentro de uma gama específica de valores de forma a antecipar variadas condições de operação. O manuseamento da Potência Reactiva (PR) é a chave para regular a tensão num sistema. Para que isso aconteça, é necessário que a PR seja fornecida na quantidade certa, no local certo e na devida altura. A maioria dos sistemas de potência eléctrica tem um deficit natural de PR devido ao facto que determinados elementos consomem mais PR do que fornecem. Existem vários elementos que são capazes de fornecer PR:

- Os geradores eléctricos são uma fonte de PR e podem também ser controlados de forma a consumirem esta mesma potência.
- Baterias de condensadores, fixos ou comutadas por um interruptor, também fornecem PR, sendo que estes últimos não são capazes de fornecer a resposta dinâmica ou o controlo preciso para efectuar uma boa regulação de tensão.
- Existem ainda outros dispositivos mais sofisticados, como os compensadores *static var*, que apresentam a vantagem de efectuar um controlo contínuo e mais rápido da PR fornecida, durante um transitório.
- Métodos Síncronos.

Em relação ao primeiro ponto, sabe-se também que um gerador de indução consome sempre PR e que se por algum motivo a tensão baixa para níveis não desejados ou se o gerador excede o escorregamento previsto, o consumo de potência reactiva dispara para valores muito pouco desejados. A MIDA pode operar tanto no quadrante capacitivo (modo gerador) como no indutivo (modo motor) em termos de PR. Esta propriedade é conseguida, mudando o ângulo do campo do rotor em relação ao campo do estator e pode ser efectuada electronicamente na altura da comutação, i.e., o dispositivo tem a capacidade de dinamicamente gerar ou absorver PR. Para geradores em Centrais de Energia das Ondas, podem ser colocados dois cenários: ou têm baterias de condensadores ligadas aos seus terminais de modo a manter o factor de potência dentro dos limites de operação, ou têm a habilidade de dinamicamente controlarem o factor de potência ou a PR aos seus terminais (caso considerado neste trabalho).

O controlo da Potência Reactiva é efectuado de duas formas distintas:

1. O RSC compensa as perdas reactivas da máquina impondo $Q_s = 0$ enquanto que a rede injecta a PR necessária para compensar as perdas do transformador e do circuito RL. Deste modo o GSC tem um factor de potência unitário.
2. Enquanto o RSC compensa as perdas reactivas da máquina impondo $Q_s = 0$, o GSC opera de modo a compensar a PR consumida no transformador e no circuito RL e disponibiliza a energia reactiva requerida pela rede.



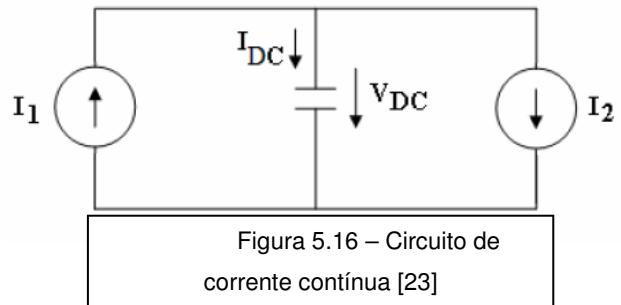
O controlo da PR é efectuado pelo GSC através de um controlador PI, obtendo-se um modelo muito semelhante ao do RSC (Figura 5.11) [59]:

Figura 5.15 - Controlador PI para controlo da Potência Reactiva pelo GSC [23]

Q_{ref} é o valor da PR no barramento 3 (Figura 5.7), calculada inicialmente em regime permanente nesse barramento, para que toda a reactiva do sistema seja compensada e disponibilizada e onde Q_C é a PR medida nesse barramento (através de um bloco semelhante ao da Figura 5.12 (b)). Os parâmetros do controlador Q foram dimensionados através da observação da resposta do sistema, para diversos valores experimentados.

5.4.4 Circuito de Tensão Contínua

O circuito intermediário de corrente pode ser representado como na Figura 5.16:



I_{DC} é a corrente que percorre o condensador e as fontes de corrente I_1 e I_2 representam respectivamente, a corrente de RSC e GSC aos terminais do lado contínuo destes.

Neste trabalho, as perdas nos conversores não são tomadas em conta, uma vez que o dimensionamento é efectuado de um modo geral e pelo facto de estas não terem uma grande implicação e impacto nos resultados finais.

Deste modo, não considerando as perdas no conversor, obtém-se I_{DC} do seguinte modo:

$$I_{DC} = I_1 - I_2 \quad [5.61]$$

$$\text{Em que, } I_1 = \frac{P_R}{V_{DC}} \text{ e } I_2 = \frac{P_C}{V_{DC}} \quad [5.62]$$

$$\text{Logo, } I_{DC} = \frac{P_R - P_C}{V_{DC}} \quad [5.63]$$

Assim, segundo [5] e tendo em conta os sentidos das correntes escolhidos na Figura 5.16, a tensão aos terminais do condensador é dada por:

$$V_{DC}(t) = \sqrt{V_{DC}^2(0) + \frac{2}{C} \int_0^t [P_R(\tau) - P_C(\tau)] d\tau} \quad [5.64]$$

Tal como anteriormente, o integral desta equação foi modelado através do método trapezoidal.

Em regime permanente $P_C = P_R$, $I_{DC} = 0$ e pela equação anterior, V_{DC} mantém-se constante e igual ao valor inicial. Durante o regime transitório vai haver um desequilíbrio entre as potências P_C e P_R , o que vai provocar uma flutuação do valor de V_{DC} . Esta tensão vai, durante o regime transitório, ser regulada para o seu valor de referência (valor inicial), pelo controlador de tensão do GSC. Pela equação de V_{DC} , verifica-se que o controlo da PA permite manter a tensão V_{DC} aos terminais constante.

6. Simulação do Modelo e Análise de Resultados

A simulação do modelo global, que interliga todos os modelos e elementos que até aqui têm sido descritos e analisados, é realizada em programação MatLab.

Para a simulação deste modelo assumem-se os seguintes pressupostos:

- A máquina de indução é duplamente alimentada, sendo a tensão do estator, V_S , imposta pela rede, através do transformador, e a tensão do rotor, V_R , imposta pelo conversor do lado do rotor.
- As perdas no ferro e perdas activas nos conversores são desprezadas.

Resultados

Para análise da eficiência do sistema de controlo implementado, a central dimensionada, foi testada para um degrau de entrada.

Seguidamente veremos a resposta da Central de Energia das Ondas ao degrau unitário, sem e com o controlo implementado na máquina de indução. Esta análise permite-nos perceber a importância da instalação de sistemas com a máquina DFIG neste tipo de centrais, para melhorar a qualidade da energia entregue á rede.

A reduzida ordem de grandeza de alguns dos valores obtidos nestes resultados devem-se à ordem de grandeza da potência obtida pela curva de pressão/potência da turbina (Figura 5.2), utilizada no modelo.

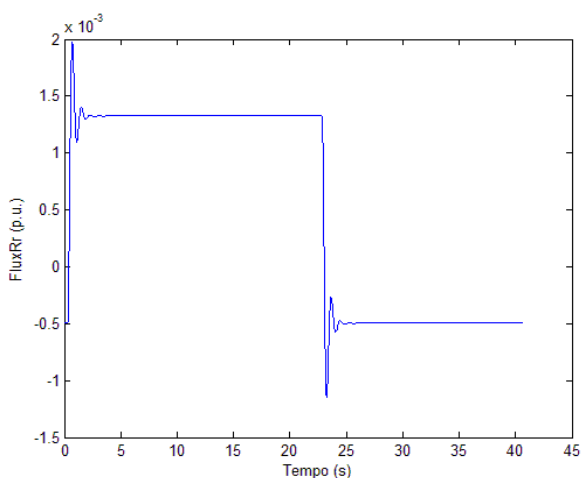


Figura 6.1 – Resposta da parte real do Fluxo do Rotor ao degrau unitário sem controlo

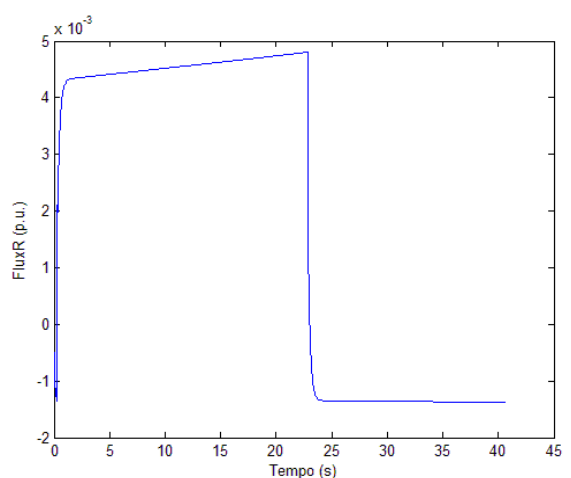


Figura 6.2 – Resposta da parte real do Fluxo do Rotor ao degrau unitário com controlo

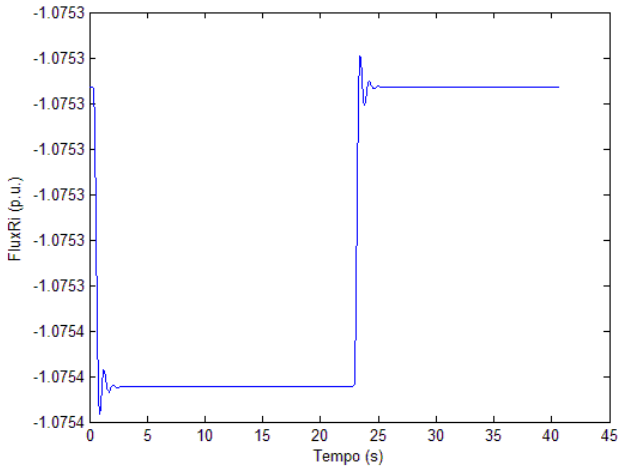


Figura 6.3 – Resposta da parte imaginária do Fluxo do Rotor ao degrau unitário sem controlo

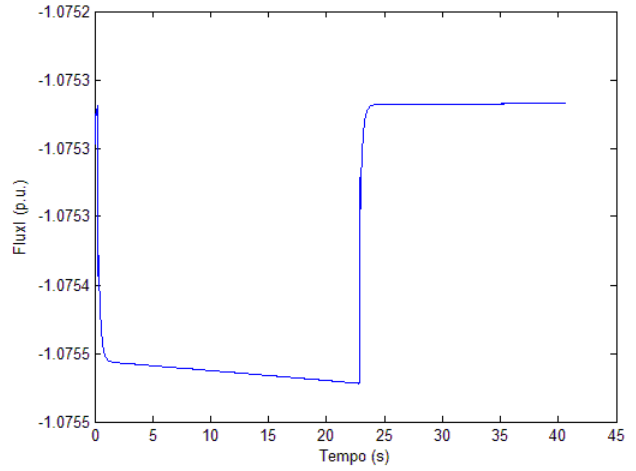


Figura 6.4 – Resposta da parte imaginária do Fluxo do Rotor ao degrau unitário com controlo

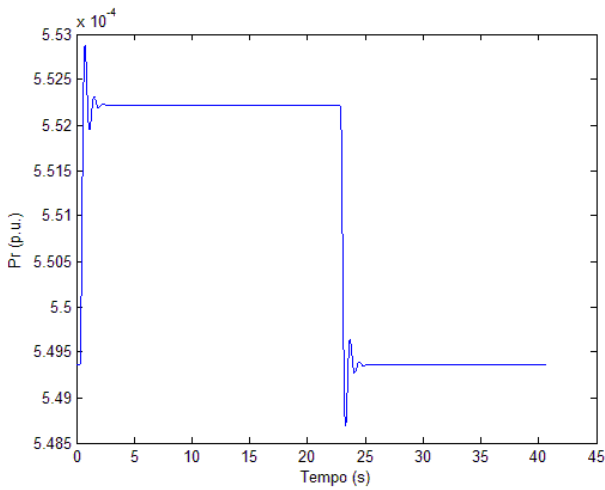


Figura 6.5 – Resposta da Potência Activa no Rotor ao degrau unitário sem controlo

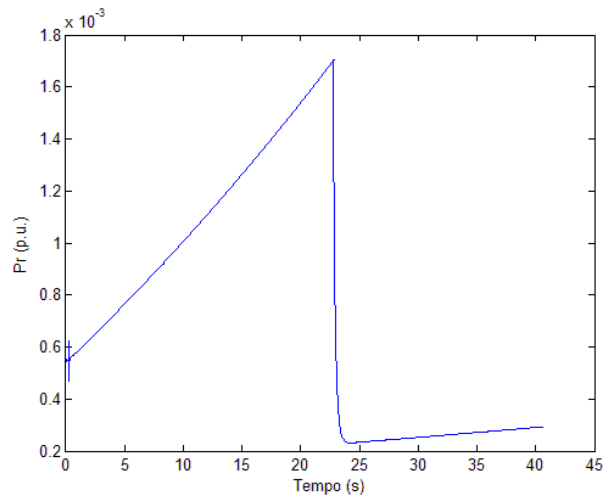


Figura 6.6 – Resposta da Potência Activa no Rotor ao degrau unitário com controlo

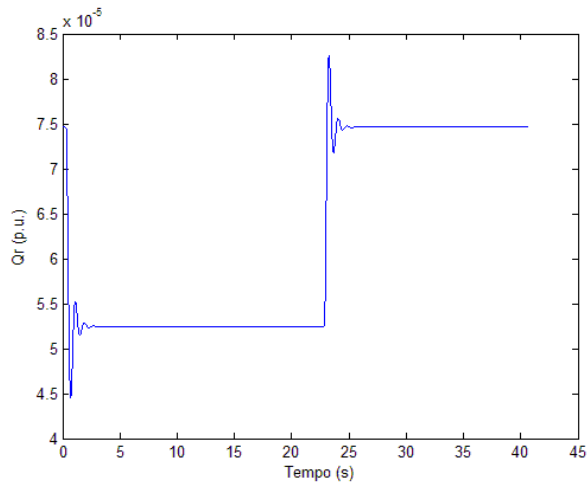


Figura 6.7 – Resposta da Potência Reactiva no Rotor ao degrau unitário sem controle

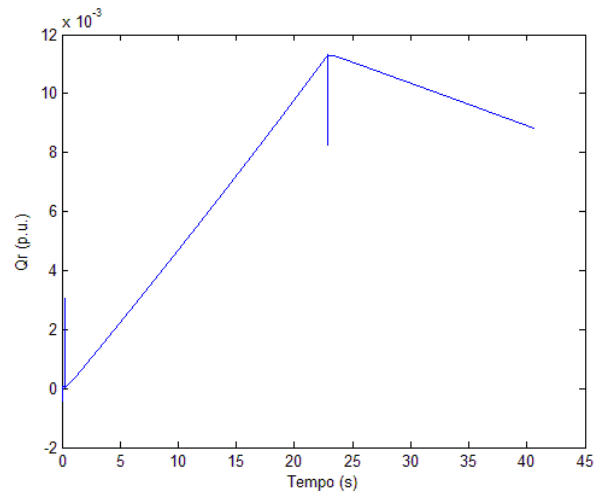


Figura 6.8 – Resposta da Potência Reactiva no Rotor ao degrau unitário com controle

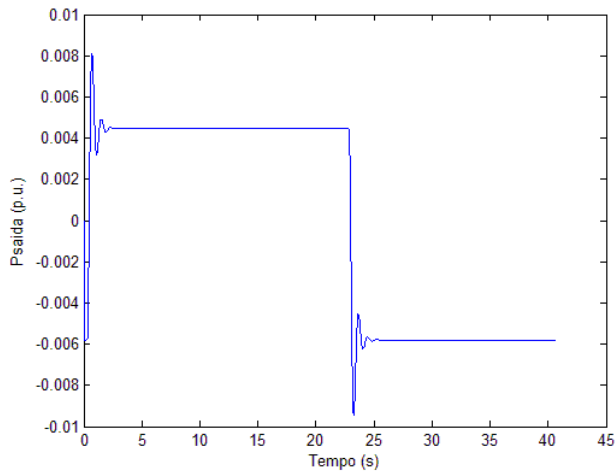


Figura 6.9 – Potência Activa de entrada na rede com o degrau unitário sem controle

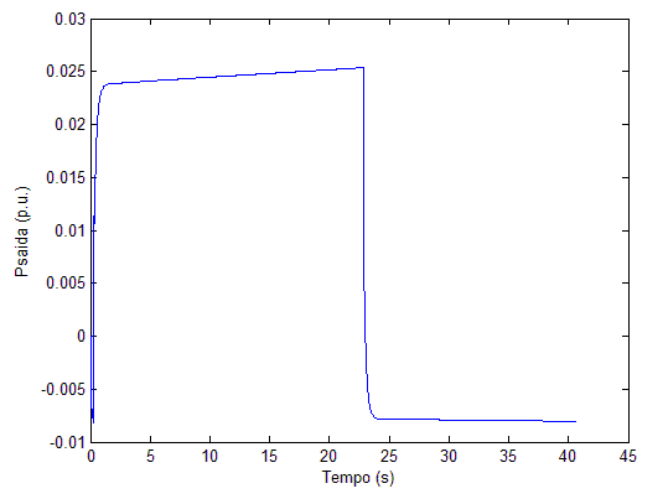


Figura 6.10 – Potência Activa de entrada na rede com o degrau unitário com controle

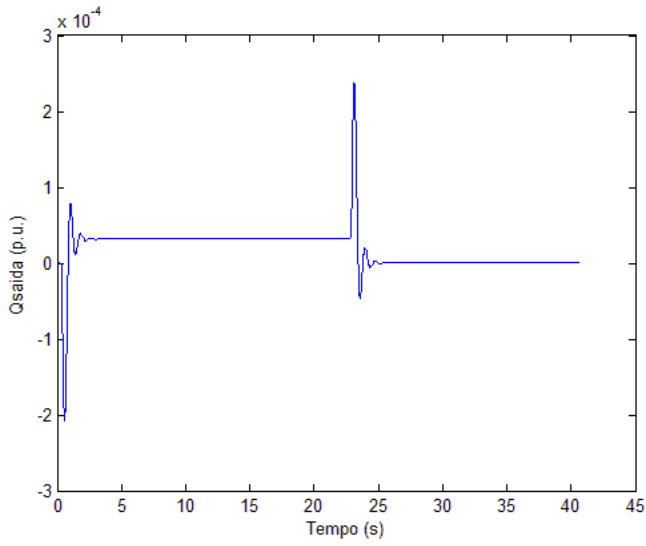


Figura 6.11 – Potência Reactiva de entrada na rede com o degrau unitário sem controlo

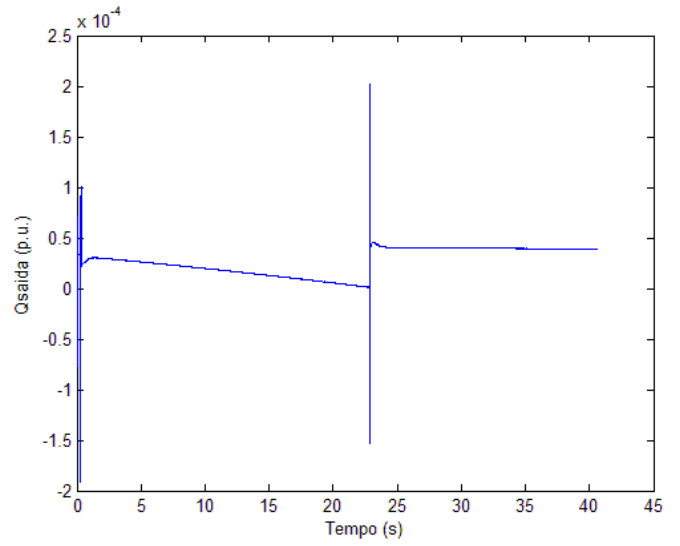


Figura 6.12 – Potência Reactiva de entrada na rede com o degrau unitário com controlo

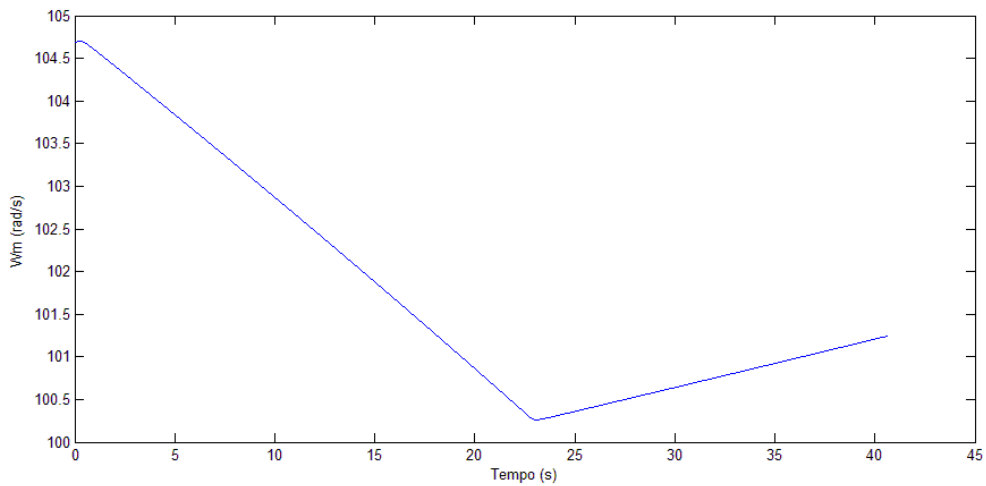


Figura 6.13 – Resposta da Velocidade de Rotação do Veio ao degrau unitário com controlo

Os resultados obtidos demonstram a efectividade do sistema de controlo implementado na máquina DFIG. Pode-se observar claramente a diferença nos transitórios do degrau; enquanto no ensaio sem controlo se verifica claramente o fenómeno de flicker, na simulação utilizando o sistema de controlo esse fenómeno não ocorre, uma vez que o controlo responde de forma rápida e eficaz à oscilação induzida como valor de entrada.

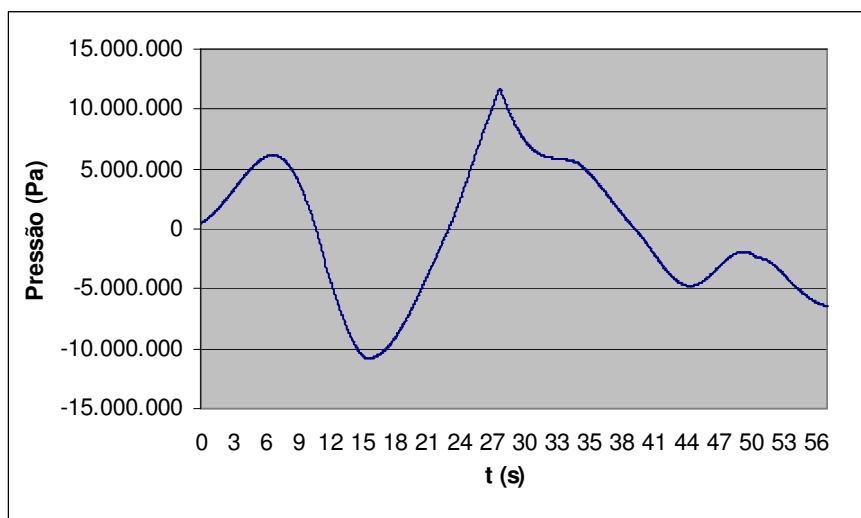
Este ensaio permite aferir a efectividade do sistema de controlo, uma vez que com os valores de entrada de uma Central de Energia das Ondas seria mais difícil identificar estas situações.

Para avaliar a qualidade de energia produzida por Centrais de Energia das Ondas, objectivo deste trabalho, foi efectuado um ensaio utilizando como valor de entrada dados modelo de uma central.

Os valores de pressão na câmara de ar, utilizados como parâmetro de entrada da turbina de Wells estão representados no gráfico da Figura 6.18:

Figura 6.14 – Pressão de ensaio à entrada da Turbina de Wells

Como seria de esperar, uma vez que a pressão na câmara de ar deste tipo de centrais depende da amplitude da



ondulação, os dados de entrada apresentam uma forma semelhante a uma sinusóide, com as devidas flutuações próprias de um meio instável como é o mar.

Estes dados de entrada permitiram realizar a simulação de uma Central de Energia das Ondas utilizando uma Turbina de Wells e uma Máquina de Indução convencional.

Os resultados foram os seguintes:

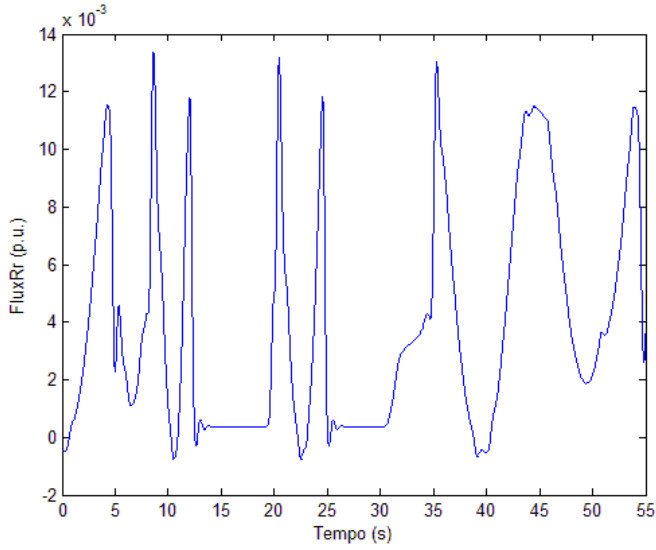


Figura 6.15 – Resposta da parte real do Fluxo do Rotor sem controlo

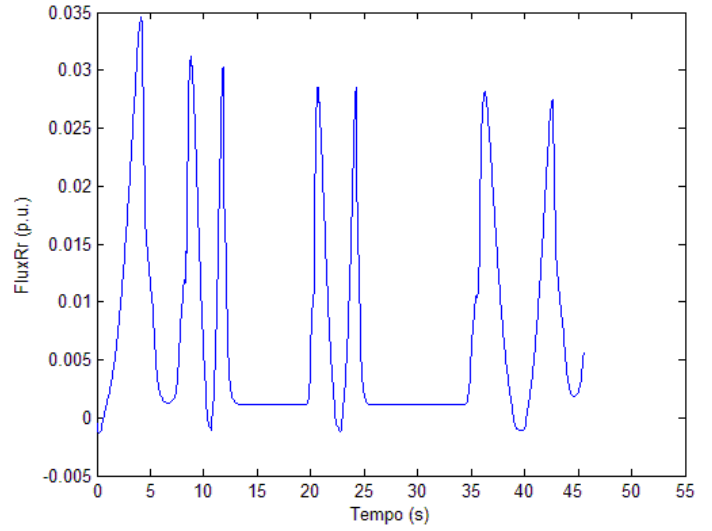


Figura 6.16 – Resposta da parte real do Fluxo do Rotor com controlo

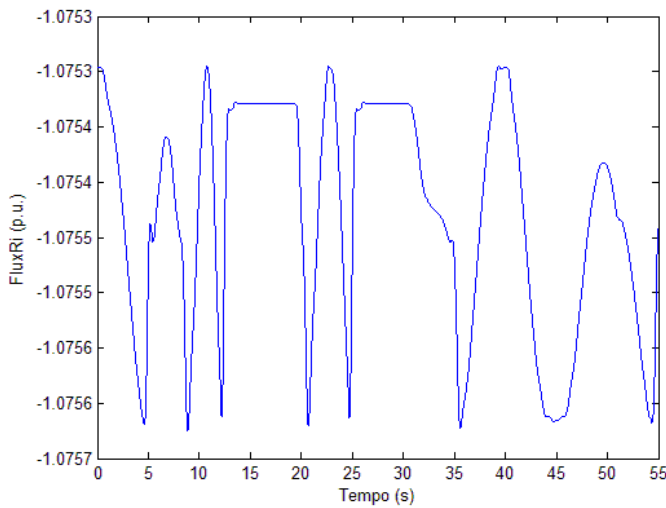


Figura 6.17 – Resposta da parte imaginária do Fluxo do Rotor sem controlo

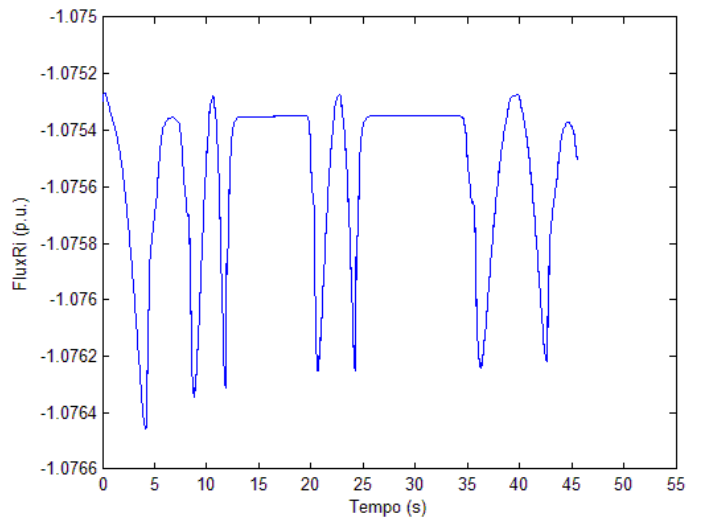


Figura 6.18 – Resposta da parte imaginária do Fluxo do Rotor com controlo

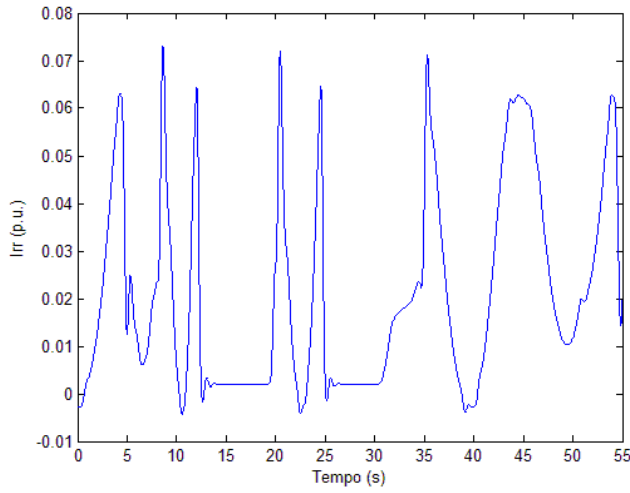


Figura 6.19 – Resposta da parte real da Corrente no Rotor sem controle

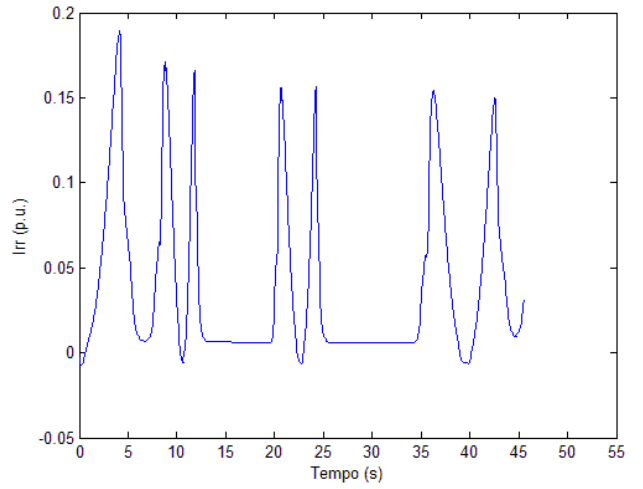


Figura 6.20 – Resposta da parte real da Corrente no Rotor com controle

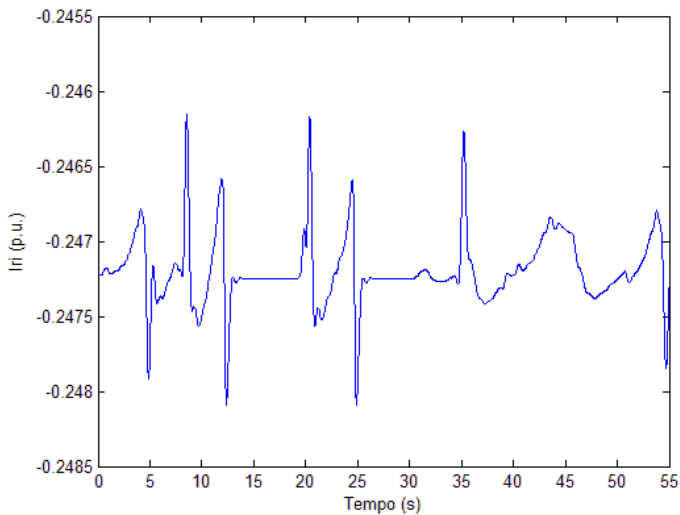


Figura 6.21 – Resposta da parte imaginária da Corrente no Rotor sem controle

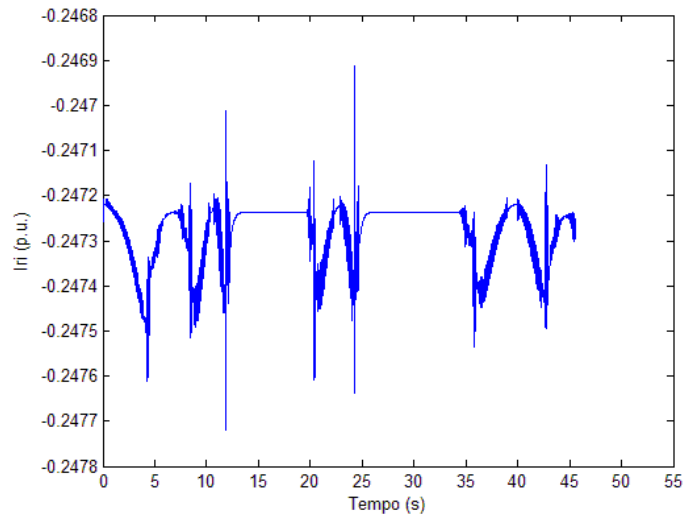


Figura 6.22 – Resposta da parte imaginária da Corrente no Rotor com controle

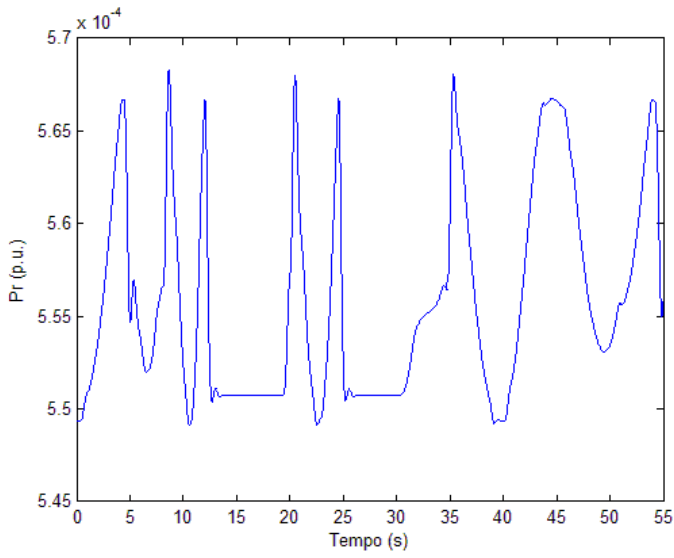


Figura 6.23 – Resposta da Potência Activa no Rotor sem controlo

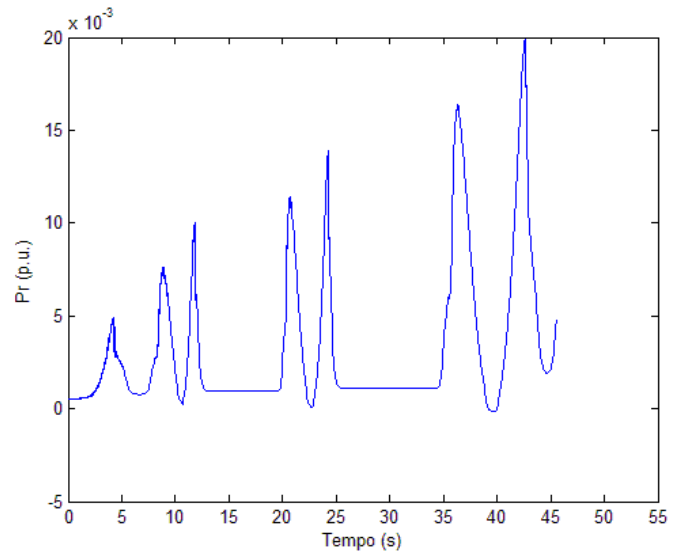


Figura 6.24 – Resposta da Potência Activa no Rotor com controlo

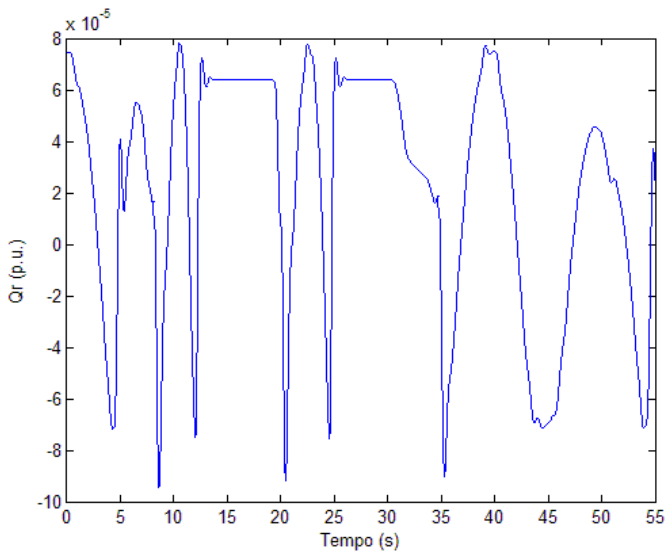


Figura 6.25 – Resposta da Potência Reactiva no Rotor sem controlo

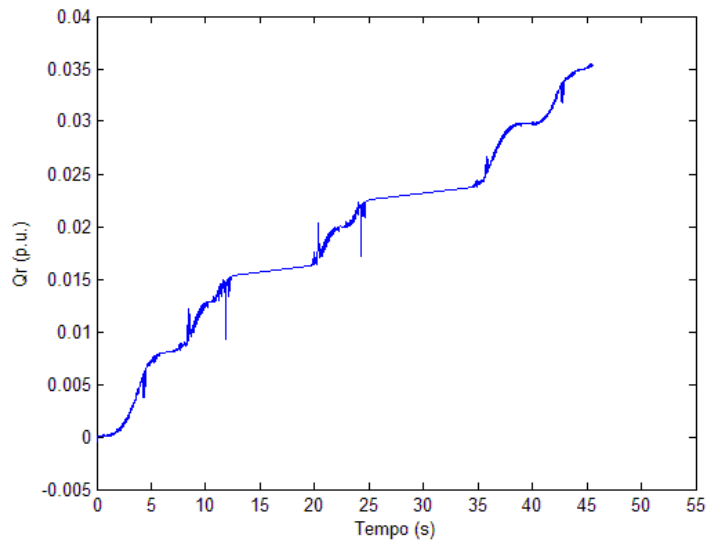


Figura 6.26 – Resposta da Potência Reactiva no Rotor com controlo

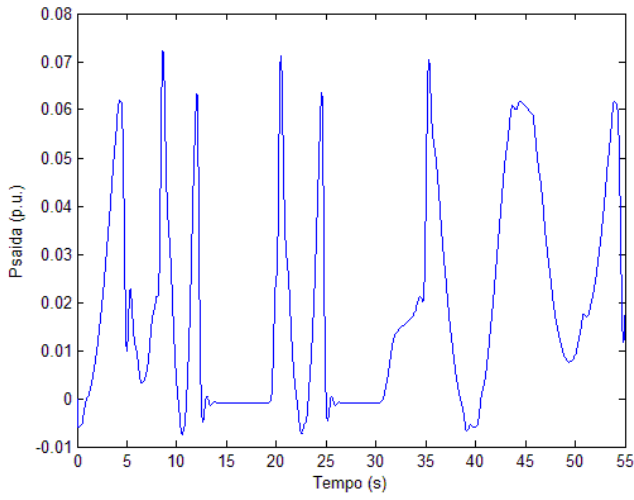


Figura 6.27 – Potência Activa de entrada na rede sem controlo

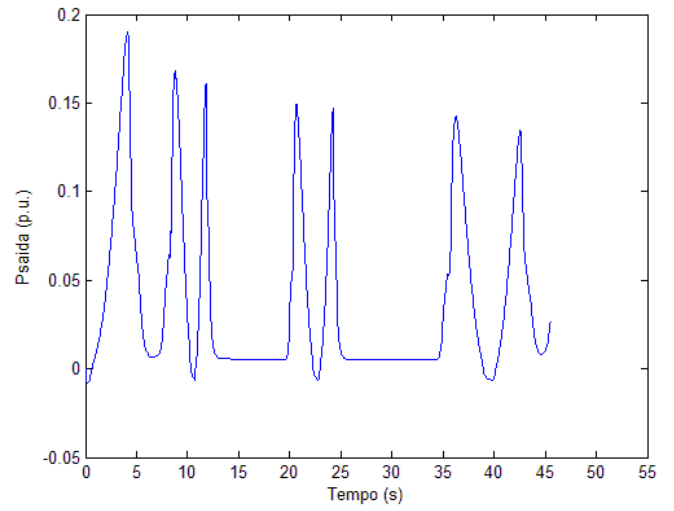


Figura 6.28 – Potência Activa de entrada na rede com controlo

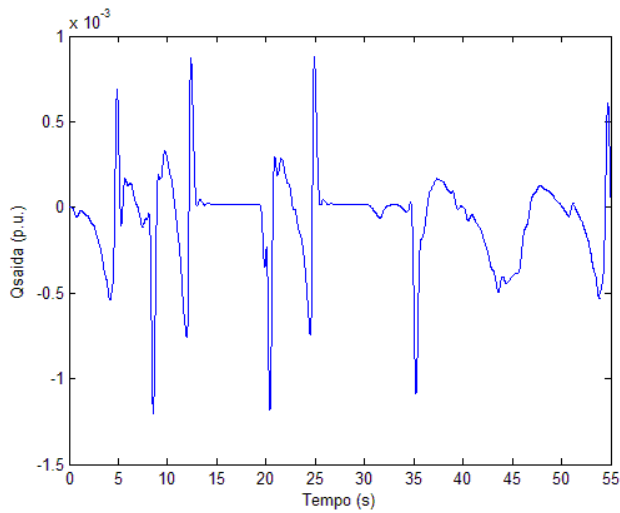


Figura 6.29 – Potência Reactiva de entrada na rede sem controlo

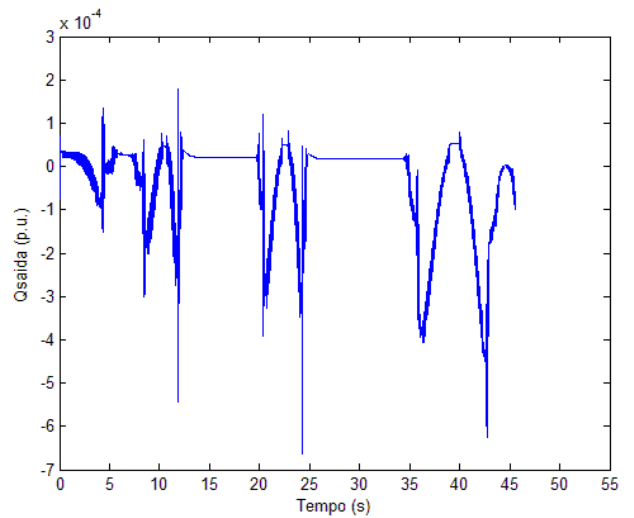


Figura 6.30 – Potência Reactiva de entrada na rede com controlo

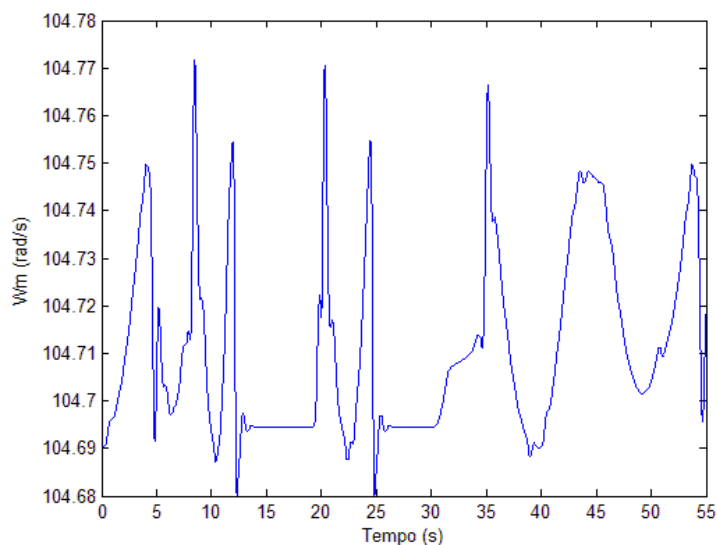


Figura 6.31 – Resposta da Velocidade de Rotação do Veio sem controlo

Com estes resultados confirma-se a análise efectuada no ensaio utilizando o degrau unitário. Pode verificar-se, em quase todas as comparações de resultados, que existe uma diferença muito significativa nos transitórios, quando se utiliza o sistema de controlo implementado e quando esse sistema não é utilizado. Tendo como exemplo a Potência Activa na saída da central, verifica-se uma variação mais estável, não se verificando os transitórios que ocorrem na simulação sem controlo. Verifica-se muito facilmente a acção do sistema de controlo, analisando por exemplo os resultados obtidos para a Potência Reactiva na saída, pode identificar-se que o sistema implementado se encontra permanentemente a efectuar pequenas correcções de modo a otimizar a energia colocada na rede. Para além da melhoria da qualidade da energia, o sistema de controlo potencia ligeiramente a potência produzida pela central.

Deste modo, a implementação de um sistema de controlo no gerador DFIG verifica-se como uma solução interessante e que poderá e deverá ser tida em conta para a instalação de futuras Centrais de Coluna de Água Oscilante, uma vez que melhora claramente a qualidade da energia entregue à rede por este tipo de centrais.

Conclusões

Os principais objectivos deste trabalho eram a elaboração de um modelo computacional de uma Central de Coluna de Água Oscilante utilizando a linguagem Matlab para simulação de centrais deste tipo, e avaliação da qualidade da energia produzida.

No início deste trabalho foi decidido que fazia sentido simular um modelo com um Sistema de Controlo no gerador incorporado. Esse modelo foi constituído por uma Turbina de Wells e uma MIDA, onde foi modelado um conversor estático duplo constituído pelo RSC, GSC e um circuito intermediário de tensão contínua. O modelo da MIDA implementado foi de 3ª ordem, não tendo sido considerados os transitórios electromecânicos.

Neste trabalho existe um grande manuseamento de equações, sendo necessário por vezes (na inicialização e no instante em que ocorre e é eliminado o defeito) recorrer a funções que permitem o cálculo de um sistema de equações quadrático e a funções que resolvam equações diferenciais. Este facto, aliado a modelar-se as funções de transferência dos controladores PI, que constituem o RSC e o GSC, em ordem ao tempo, apresenta alguns problemas ao serem implementadas em MatLab. O problema reside principalmente no facto do programa MatLab fazer aproximações, que por vezes, traduzem-se em pequenos desvios dos valores calculados em relação aos de referência dos controladores PI, o que acaba por criar uma propagação de erros por estes, afectando assim o sensível controlo da MIDA.

Devido ao grande número de equações implementadas, o processo de simulação e obtenção de resultados torna-se muito demorado sendo que, para obter os resultados de aproximadamente 45 segundos de funcionamento da central são necessários 4 dias em simulação com o software.

Apesar dessas dificuldades e limitações, os objectivos inicialmente traçados foram alcançados, tendo-se simulado o funcionamento de uma unidade de produção de energia através da ondulação do mar, com resultados próximos dos obtidos em unidades reais implementadas. Para além desse facto foi provado o impacte e importância da implementação de controladores neste tipo de centrais, devido às vantagens da qualidade da energia entregue à rede, quando comparadas com centrais sem qualquer controlo.

Sabendo que Portugal apresenta condições particularmente favoráveis para o aproveitamento da energia das ondas, sobretudo numa fase inicial de desenvolvimento desta tecnologia: recurso energético médio-alto, águas relativamente profundas a pouca distância da costa, portos e estaleiros navais perto dos possíveis locais de instalação dos parques de energia das ondas e rede eléctrica de transporte junto à costa, é essencial ter em conta a qualidade da energia produzida neste tipo de centrais. Sendo que, os geradores utilizados nas primeiras instalações foram máquinas assíncronas, sem qualquer tipo de controlo, e tendo em consideração a experiência de várias décadas na área do eólico, com claras semelhanças com esta tecnologia, torna-se importante a implementação de sistemas de controlo que permitam, não só otimizar a qualidade de energia entregue à rede como o

próprio rendimento da central. Deste modo, torna-se essencial ter em consideração os sistemas de controlo utilizados nas Centrais de Coluna de Água Oscilante, pois terão clara influência quer no sucesso desta tecnologia como na qualidade e eficiência da electricidade produzida.

Bibliografia

- [1] A.J.N.A. Sarmento, L.M.C. Gato, A.F. de O. Falcão, "Turbine-controlled wave energy absorption by oscillating-water-column devices". *Ocean Engineering*, vol. 17, p. 481-497, 1990.
- [2] A.J.N.A. Sarmento, A.F. de O. Falcão, "Wave generation by an oscillating surface-pressure and its application in wave-energy extraction". *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 150, p. 467-485, 1985.
- [3] A.F. de O. Falcão, P.A.P. Justino, "OWC wave energy converters with valve-constrained air flow", *Proceedings of the Second European Wave Power Conference*, European Commission, EUR 16932 EN, p. 187-194, 1995.
- [4] A.F. de O. Falcão, P.A.P. Justino, "OWC Wave Energy Devices with Air-flow Control". *Ocean Engineering*, vol. 26, p.1249-73, 1999.
- [5] Akhmatov, Vladislav, "Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems with large amount of wind power", Ph. D. Thesis, Technical University of Denmark, Dinamarca, 2003.
(<http://server.oersted.dtu.dk/eltek/res/phd/00-05/va-thesis.pdf>)
- [6] Balduino, R. and Hofmann, W., "Optimised Power Flow on Wind Power Plants with the Doubly Fed Induction Generator", Faculty of Electrical Engineering, Chemnitz, Alemanha.
(<http://www.tu-chemnitz.de>)
- [7] Barroso, L. e Lameira, J., "Modelo em regime transitório para um gerador eólico equipado com uma máquina de indução duplamente alimentada", Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2005
- [8] Batle, C., Dória-Cerezo, A. and Ortega, R., "Power Flow Control of a Doubly- Fed Induction Machine Coupled to a Flywheel".
(<http://www.supelec.fr/lss/CTS/WWW/preprint-doria-01.pdf>)
- [9] Brito-Melo, A., "Modelação e Prédimensionamento de Centrais de Coluna de Água Oscilante: Aplicação à Central de Energia das Ondas do Pico, Açores", PhD thesis, IST (in Portuguese), 2000.
- [10] Brito-Melo, A., Sarmento, A.J.N.A., Gato, L.M.C., "Mathematical extrapolation of tank testing results: application to the Azores wave pilot plant." In: Elliot, G., Diamantaras, K. (Eds.), *Proceedings of the Second European Wave Power Conference*. European Commission, Rep. EUR 16932 EN, pp. 141–147, 1995.
- [11] Budal, K. e Falnes, J., "Interacting Point Absorbers with Controlled motion. Power from Sea Waves", edited by B. Count, pp. 381-389, 1980.
- [12] Campos, Fábio G. R., "Geração de Energia a partir de Fonte Eólica com Gerador Assíncrono Conectado a Conversor Estático Duplo", Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia, São Paulo, Brasil, 2004.
(http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-25062004_130205/publico/pdfGalizia.pdf)
- [13] Cardoso, Inês e Ferraz, Ricardo, "Modelação Integrada e Avaliação da Qualidade de Energia de Parques Eólicos", Trabalho de Final de Curso, IST, Portugal, 2003.
- [14] Castro, Rui M. G., "Introdução à Energia Mini-Hídrica", Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2004.
(http://enerp4.ist.utl.pt/erprod/Download/Mh_ed2.pdf)
- [15] Castro, Rui M. G., "Introdução à Energia Eólica", Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2005.
(http://enerp4.ist.utl.pt/erprod/Download/Eolica_ed2p1.pdf)

- [16] Centro da Energia das Ondas, “Potencial e Estratégia de Desenvolvimento da Energia das Ondas em Portugal”, 2004.
- [17] Center for Renewables Energy Sources, “Ocean Energy Conversion in Europe”, edited by European Commission, 2006.
- [18] Cruz, J.M.B.P, Sarmiento, A.J.N.A., “Energia das Ondas – Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais”, 2004.
- [19] Emanuel, A.E, McNeill, J.A., “Electric Power Quality”, Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts, 1997.
- [20] ETSU e CCE, “An assesment of the state of the art, technical perspectives and potential market for wave energy”, Report for DG XVII, technical direction Dr.-Ing. W. Dursthoff, 1992.
- [21] Datta, R. and Ranganathan, V. T., “Decoupled Control of Active and Reactive Power for a Grid-Connected Doubly-Fed Wound Rotor Induction Machine without Position Sensors”, In Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Fourth IAS Annual Meeting (Cat. No. 99CH36370), pp. 2623- 2628.
(<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/6470/17294/00799208.pdf?arnumber=799208>)
- [22] Dente, António, “Aspectos Dinâmicos da Máquina Assíncrona”, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2004.
(ftp://macdente.ist.utl.pt/MQII_04_05/M%E1quina%20ass%EDncrona.pdf)
- [23] DigSilent GmbH, “ Dynamic Modelling of Double-Fed Induction Machine Wind-Generators”, Gomaringen, Alemanha, 2003.
(<http://www.digsilent.de>)
- [24] Dixon, S.L., “Fluid Mechanics and Thermodynamic of Turbomachinery. 4th ed.”, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1998
- [25] Falcão A., “The shoreline OWC wave power plant at the Azores”, Proc. of the 4th European Wave Energy Conference, Aalborg, Denmark, pp. 42-48, 2000.
- [26] Gato, L.M.C., Falcão, A.F. de O., “Performance of the Wells turbine with variable pitch rotor blades.” ASME Journal of Energy Resources Technology 113, 141–146, 1991.
- [27] Gato, L.M.C., Warfield, V., Thakker, A., “Performance of a high-solidity Wells turbine for an OWC wave power plant.” Transactions of ASME Journal of Energy Resources Technology 118, 263–268, 1996.
- [28] Hopfensperger, B., Atkinson, D. J. and Lakin, R. A., “Stator-flux-oriented Control of a Doubly-fed Induction Machine with and without Position Encoder”. IEEE Proceedings Electric Power Applications, 147(4):241-50, 2000.
(<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/2194/18645/00859338.pdf?arnumber=859338>)
- [29] Hoskin, R.E., Count, B.M, Nichols, N.K e Nicol, D.A.C., “Phase control for the Oscillating Water Column.” Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization, IUTAM Symposium, Lisbon, Portugal, pp.257-268, 1985.
- [30] J.N.B.A. Perdigão, “ Optimização da extracção de energia das ondas por coluna de água oscilante.” Tese de mestrado em Eng^a Mecânica, IST, Portugal, 1989.
- [31] J.N.B.A. Perdigão, A.J.N.A. Sarmiento, “A phase-control strategy for OWC devices in irregular seas”, Proceedings of the 4th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Oystese, Norway, p. 205-209, 1989.
- [32] Jefferys, R. e Whittaker, T., “Latching control of an Oscillating Water Column device with Air Compressibility.” Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization, IUTAM Symposium, Lisbon, Portugal, pp.281-292, 1985.

- [33] Jesus, J. M. Ferreira, “A máquina duplamente alimentada (versão draft)”, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2004.
(http://enerp4.ist.utl.pt/erprod/Download/Mida_Draft.pdf)
- [34] Jesus, J. M. Ferreira e Castro, Rui M. G., “Equipamento Eléctrico dos Geradores Eólicos”, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2004.
(http://enerp4.ist.utl.pt/erprod/Download/Equipamento_ed0.pdf)
- [35] Justino, P.A.P., “Controlo de fase de sistemas de coluna de água oscilante para extracção de energia das ondas.” Tese de mestrado em Eng^a Mecânica, IST, Portugal, 1993.
- [36] Ko, Hee-Sang, Jatskevich, Juri, “Power Quality Control of Wind-Hybrid Power Generation System Using Fuzzy-LQR Controller”, University of British Columbia, Vancouver, 2005.
- [37] L.M.C. Gato, V. Warfield, A. Thakker, “Performance of a high-solidity Wells turbine for an OWC wave power plant”, Proceedings of the First European Wave Energy Symposium, Edinburgh, p. 181-189, 1993.
- [38] L.M.C. Gato, A.F. de O. Falcão, “Aerodynamics of the Wells turbine”. International Journal of Mechanical Sciences, vol. 30, p. 383-395, 1988.
- [39] Larsson, A., Sorensen, P. and Santjer, F., “Grid Impact of Variable Speed Wind Turbines”, In European Wind Energy Conference and Exhibition (EWEC 99), Nice, France, 1999.
- [40] Marques, Gil, “Máquinas de indução polifásicas”, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2001.
- [41] Marques, Gil, “Controlo de motores eléctricos”, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 1999.
- [42] Martins, M., “Stability Issues Related to Implementation of Large Wind Farms”, Chalmers University of Technology, Suécia, 2005.
- [43] Ministério da Economia e da Inovação, “Renováveis – Estatísticas rápidas”, Lisboa, Portugal, 2005.
(<http://www.dge.pt/arquivo/publicacoes/RelRovaveis200507.pdf>)
- [44] McCormick, M.E., “Ocean Wave Energy Conversion”, John Wiley & Sons, 1981.
- [45] McCormick, M.E., Surko, S.W., “An experimental study of the performance of the counter-rotating wave energy conversion turbine.” ASME Journal of Energy Resources Technology 111, 167–173, 1989.
- [46] Müller, S., Deicke, M. and Donker, Rik W. De, “Adjustable Speed Generators for Wind Turbines based on Doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor”, Alemanha, 2000.
(<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7073/19103/00883138.pdf?arnumber=883138>)
- [47] Neumann, F., Sarmiento A.J.N.A, “An Assessment of Technical and Economical Viability of OWC Integration in Breakwaters”; Proc. 4th European Wave Power Conf., University of Aalborg, Denmark, paper B3, 2000.
- [48] Nichols, N.K., Falcão, A.F. de O. e Pontes, M.T., “Optimal phase control of wave power device.” Wave Energy, Inst. Mech. Engrs, London, pp. 41-46, 1991.
- [49] Novotny, D. W., Lipo, T. A., “Vector Control and Dynamics of AC Drives”, Oxford University Press, U.K., 1996.
- [50] P.A.P. Justino, N.K. Nichols, A.F. de O. Falcão, “Optimal Phase Control of OWCs”. Proceedings of the First European Wave Energy Symposium, Edinburgh, p. 145-149, 1993.

- [51] P.A.P. Justino, A.F. de O. Falcão, "Control simulation of an OWC wave power plant". Proceedings of the Second European Wave Power Conference, European Commission, EUR 16932 EN, p. 268-272, 1995.
- [52] P.A.P. Justino, A.F. de O. Falcão, "Rotational Speed Control of an OWC Wave Power Plant". ASME Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, vol. 65, p.65-70, 1999.
- [53] Paiva, José Pedro Sucena, "Fundamentos dos Sistemas de Energia Eléctrica", Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- [54] Pena, R., Clare, J. C. and Asher, G. M., "Doubly Fed Induction Generator using back-to-back PWM Converters and its Application to Variable-Speed Wind Energy Generation", IEE Proceedings Electric Power Applications, 143(3):231 41, May 1996.
- [55] Perdana, A., Carlson, O. and Persson, J., "Dynamic Response of Grid Connected Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator during Disturbances", Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, Trondheim, Holanda, 2004.
- [56] Perdigão, J.N.B.A, " Reacti-Control Strategies for na Oscillating-Water-Column Device". Tese de Doutoramento em Eng^a Mecânica, IST, Portugal, 1998.
- [57] Petersson, A., " Analysis, Modelling and Control of Double-Fed Induction Generators for Wind-Turbines", Thesis for the Degree of Licentiate of Engineering, Chalmers University of Technology, Gotembrugo, Suécia, 2003.
- [58] Petru, Tomás, "Modelling of Wind Turbines for Power System Studies", Chalmers University of Technology, Goteborg, Suécia, 2003.
(http://www.vindenergi.org/Vindforskrappporter/CTH_Petru_Dr.pdf)
- [59] Pöller, M., "Doubly Fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms", Alemanha.
(http://www.digsilent.de/Consulting/Publications/DFIG_Modeling.pdf)
- [60] Raghunathan, S., "The Wells air turbine for wave energy conversion." Progress in Aerospace Sciences 31, 335–386, 1995.
- [61] Salles, M., "Análise do Desempenho Dinâmico de Geradores Eólicos conectados em Redes de Distribuição de Energia Eléctrica", Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2004.
- [62] Sarmento, A., "Model-Test Optimization of an OWC Wave Power Plant". Intl. Journal of Offshore and Polar Engn., Vol. 3, N^o 1 (March 1993), ISOPE, 1993.
- [63] Sarmento, A.J.N.A, Neumann, F., Britomelo, A., "Non-technical barriers to large-scale Wave Energy Utilisation", submetido na conferência New and Renewable Energy Technology for Sustained Development, Évora, 2004.
- [64] Sarmento, A.J.N.A., Neumann, F., Britomelo, A., "Estudo Socio-económico do desenvolvimento da energia das ondas em Portugal", submetido na conferência nacional ENER04, Figueira da Foz, 2004.
- [65] Seman, S., Niiranen, J., Kanerva, S. and Arkkio, A., "Analysis of 1.7 MVA Doubly Fed Wind Power Induction Generator during Power Systems Disturbances", Helsinki University of Technology, Helsinki, Finlândia, 2004.
- [66] Soens, J., Thong, V. V., Driesen, J. and Belmans, R., " Modelling Wind Turbine Generators for Power System Simulations", European Wind Energy Conference EWEC, Madrid, Madrid, Espanha, Junho 2003.
(<http://www.ingentaconnect.com/content/mscp/wind/2004/00000028/00000001/art00003>)
- [67] Takahashi, S., "Design of Vertical Breakwaters". Reference Document No. 34.Port and Harbour Research Institute Ministry of Transport, Japan, 1996.

[68] Tang, Y. and Xu, L., "Flexible Active and Reactive Power Control Strategy for a Variable Speed Constant Frequency Generating System", IEEE Transactions on Power Electronics, 10 (4): 472-478, 1995.

(<http://ieeexplore.ieee.org/iel2/3313/9945/00471983.pdf?arnumber=471983>)

[69] Thorpe, T. W., "A review of wave energy", Report ETSU-R-72 for the DTI, AEA Technology, 1992.

[70] Thorpe, T. W., "A brief review of wave energy", Report ETSU-R-120 for the DTI, AEA Technology, 1999.

[71] Thorpe, T.W., "A Brief Review of Wave Energy", DTI, Reino Unido, 1999.

[72] Thorpe, T.W., "Wave Energy - Current Status and Developments", disponível em www.nesea.org, 2001.

[73] Wang, S. and Ding, Y., "Stability Analysis of Field Oriented Doubly Fed Induction Machine drier based on Computer Simulation", Electric Machines and Power Systems, 21 (1):11-24, 1993.

[74] Xu, L. and Wei, C., "Torque and Reactive Power Control of a Doubly Fed Induction Machine by Position Sensor less Scheme", IEEE Transactions on Industry Applications, 31(3):636-42, 1995, Copyright 1995, IEEE.

[75] Vries, M. d., "Assessment of the Environmental Impact of the Archimedes Wave Swing", WL Delft Hydraulics, 2000.

Anexos

A. Grandezas em p.u.

Para uma maior facilidade no manuseamento das equações envolvidas para o desenvolvimento deste trabalho, as grandezas e parâmetros que compõem o modelo são reduzidas ao sistema por unidade, p.u.. Para tal, a base de potência escolhida é a potência nominal da máquina de indução. Se em relação ao transformador e circuito RL a mudança de base não é particularmente complicada de efectuar, em relação ao conversor, uma redução ao sistema p.u. acresce de algum cuidado. De seguida demonstra-se como tal é efectuado.

A partir das equações:

$$\begin{aligned} X^Z &= |X|e^{j\phi}e^{-j\theta} \\ \Leftrightarrow X^Z &= |X|e^{j(\phi-\theta)} \\ \Leftrightarrow X^Z &= X^Z_d + jX^Z_q \end{aligned}$$

Tem-se que:

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow V_{AC} &= \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}V_{DC}m_a \\ \Leftrightarrow V_{DC} &= \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}m_a}V_{AC} \end{aligned}$$

$$\text{Logo pode-se exprimir } V_{DC}base : V_{DC}base = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}m_a}V_{AC}base$$

Uma vez que se desprezam as perdas nos conversores tem-se:

$$P_{AC} = P_{DC} \Leftrightarrow \sqrt{3}V_{AC}I_{AC} = V_{DC}I_{DC}$$

Assim:

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow I_{AC} &= \frac{2\sqrt{2}}{3m_a}I_{DC} \\ \Leftrightarrow I_{DC} &= \frac{3m_a}{2\sqrt{2}}I_{AC} \end{aligned}$$

Logo, a partir da expressão anterior pode-se exprimir $I_{DC}base$: $I_{DC}base = \frac{3m_a}{2\sqrt{2}} I_{AC}base$

Tem-se então:

$$Z_{DC}base = \frac{V_{DC}base}{I_{DC}base} = \frac{\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}m_a} V_{AC}base}{\frac{3m_a}{2\sqrt{2}} I_{AC}base} = \frac{8}{3\sqrt{3}m_a^2} \frac{V_{AC}base}{I_{AC}base} = \frac{8}{3m_a^2} Z_{AC}$$

Assim, as equações obtidas permitem obter a mudança de base a efectuar para os parâmetros do circuito de tensão contínua.

Para o GSC, dado o facto do circuito de corrente contínua estar na base p.u. da MIDA e a tensão de base da tensão AC aos terminais do GSC estar numa base de tensão diferente da do estator, ao serem aplicadas as equações do controlo vectorial, é necessário efectuar uma mudança de base de tensões para a tensão V_{AC} obtida na base da tensão nominal do terciário do transformador.