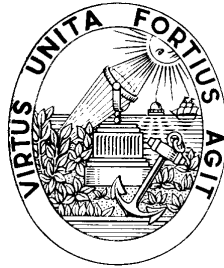


FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores



**Sistema de Recuperação da Energia de Deslizamento
aplicado ao
Aproveitamento da Energia das Ondas Marítimas**

Carlos João Rodrigues Costa Ramos

Licenciado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores pela Faculdade de Engenharia
da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre
em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores
(Área de especialização de Automação Industrial)

Porto, Novembro de 1997

Carlos João Rodrigues Costa Ramos
cjr@tormentas.fe.up.pt

Sistema de Recuperação da Energia de Deslizamento
aplicado ao
Aproveitamento da Energia das Ondas Marítimas

Dissertação realizada sob a supervisão do
Prof. Dr. Adriano da Silva Carvalho
do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação realizada com o apoio do Gabinete PRAXIS XXI e da JNICT

Agradecimentos

Escrever a página de agradecimentos é uma tarefa ingrata porque existe sempre o perigo de se esquecer alguém que tenha contribuído para o sucesso do trabalho.

Estando ciente do perigo, gostaria de destacar algumas das pessoas que mais contribuíram para a realização deste trabalho:

O Prof. Dr. Adriano da Silva Carvalho, pela orientação do trabalho.

Os meus amigos e colegas no Instituto de Sistemas e Robótica, em particular o Armando Sousa, o Carlos Martins, o Paulo Costa e o Joaquim Alves pelas “dicas”, e pela sua amizade.

Aos vários elementos da Efacec, em particular o Eng. Pedro Silva.

Os meus pais, por todo o apoio e incentivo que me deram durante toda a minha vida, sem os quais este trabalho nunca teria sido iniciado.

A Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e o Instituto de Sistemas e Robótica, pela cedência de instalações e equipamento.

Ao Gabinete PRAXIS XXI da JNICT pelo financiamento.

Resumo

Na sequência do cada vez maior interesse pelo aproveitamento dos recursos energéticos alternativos e não poluentes, foi construída nos Açores uma central para produção de electricidade a partir da energia das ondas marítimas.

Para otimizar o recurso energético das ondas marítimas o gerador eléctrico deve funcionar com uma velocidade dependente da potência gerada. Para que a energia possa ser enviada para a rede de distribuição pública, tem de possuir tensão e frequência constantes.

Deste modo, os tradicionais geradores síncronos não são apropriados para enviar à rede a electricidade produzida a partir da energia das ondas marítimas.

Das várias alternativas para o gerador eléctrico, o Sistema de Recuperação de Energia de Deslizamento (SRED) é o que apresenta melhores argumentos, quer a nível técnico, quer a nível de custos.

O SRED consiste numa máquina assíncrona de rotor bobinado e num conjunto de conversores electrónicos de potência. Os conversores estão ligados entre o rotor da máquina e a rede. Controlam a máquina variando a quantidade de energia retirada ao rotor e entregue à rede.

A sua principal vantagem é conseguir produzir o dobro da potência para a qual, quer a máquina, quer os conversores são dimensionados. Isto acontece porque a potência gerada é enviada à rede, repartida pelo estator e pelo rotor.

Devido à utilização dos conversores electrónicos ligados ao rotor, a máquina assíncrona adquire características de funcionamento semelhantes a uma máquina de corrente contínua de excitação separada.

Nesta dissertação é estudado o SRED para o gerador da referida central, sendo apresentadas as diversas fases do projecto dos subsistemas que constituem o SRED.

Résumé

En conséquence de l'accroissement de l'intérêt sur l'exploitation des ressources alternatifs et non polluants, une centrale a été construite aux Açores pour la production d'énergie électrique à partir des ondes maritimes.

En vue de l'optimisation du ressource énergétique des ondes maritimes, le générateur électrique doit fonctionner à vitesse variable et dépendante de la puissance générée. Pour que l'énergie générée puisse être injectée sur le réseau de distribution publique, la maîtrise de la tension et de la fréquence devient un aspect important à prendre en compte.

Ainsi, les traditionnels générateurs synchrones ne se révèlent pas bien adaptés pour envoyer l'électricité générée à partir des ondes maritimes au réseau publique.

Parmi les diverses solutions envisageables pour la mise en oeuvre du générateur électrique, le Système de Récupération de l'Energie de Glissement (SRED) présente les argumentations les plus convaincantes, soit au niveau technique, soit au niveau économique.

Le SRED est constitué par une machine asynchrone à rotor bobiné et par un ensemble de convertisseurs statiques de puissance. Les convertisseurs sont connectés d'un coté au rotor de la machine, et de l'autre coté au réseau électrique. De cette manière, l'énergie transmise au rotor par le stator de la machine (énergie de glissement) est récupérée et renvoyée vers le réseau.

Son principal avantage est de permettre la production d'une puissance double par rapport à la puissance nominale de la machine et des convertisseurs. Ceci, parce que la puissance générée est envoyée au réseau aussi par le stator que par le rotor.

Grâce à l'utilisation des convertisseurs statiques connectées au rotor, la machine asynchrone possède des caractéristiques de fonctionnement qui ressemblent celles de la machine à courant continu à excitation séparée.

Au cours de cette dissertation, le SRED pour le générateur de la centrale mentionnée ci-dessus est étudié, et les diverses étapes du travail de projet de ses sous-systèmes constitutifs sont présentés.

Abstract

As a consequence of the increasingly interest for taking advantage of the energetic non pollutant renewable resources, a wave energy plant for electricity production as been built in Azores.

In order to optimize the energetic resources of the ocean waves, the electric generator must work at variable speed depending on the generated power. For the energy to be injected in the electric public distribution network a particular interest as to be focused on both voltage magnitude and frequency control.

Hence, traditional systems based on the synchronous generator are not suitable for transmitting the ocean waves energy toward the electric network.

Between several possibilities for the implementation of the electric generator, the Slip Energy Recuperation System (SRED) seems to present the most interesting arguments not only in the technical field, but also in the economical one.

SRED system set consists in an induction wound-rotor machine and electronic static converters connected between the rotor windings and the electric network. The machine is controlled by acting on the quantity of energy delivered by the stator to the rotor (slip energy) which then will be injected in the network.

Its major advantage consists in the possibility for producing twice the nominal power of the induction machine and converters. This happens because the generated power is delivered to the distribution network spread by the stator and by the rotor.

Due to the use of electronic converters connected to the rotor the induction machine reveals behavioral characteristics very close to the separately excited DC machine ones.

In this dissertation, the SRED system for the above mentioned wave energy plant is deeply studied as also the several steps for its sub-systems design.

Índice

<i>Agradecimentos</i>	v
<i>Resumo</i>	vii
<i>Résumé</i>	ix
<i>Abstract</i>	xi
<i>Índice</i>	xiii
<i>Índice de figuras</i>	xvii
Capítulo 1	
Introdução	1
1 Objectivos.....	3
2 Estrutura da dissertação.....	3
Capítulo 2	
SRED aplicado ao aproveitamento da energia das ondas marítimas	5
1 Breve descrição das energias renováveis.....	5
2 O aproveitamento da energia das ondas oceânicas.	7
3 Central construída.....	8
4 Armazenamento e disponibilidade de energia.....	9
5 Requisitos para o gerador.....	11
5.1 Escolha do gerador.....	13
6 O sistema de recuperação de energia de deslizamento (SRED).....	15
6.1 Princípio de funcionamento do SRED.....	19
7 Sistema de recuperação de energia de deslizamento utilizado.....	27
Capítulo 3	
Conversão de tensão alternada em corrente contínua	31
1 Fonte de tensão: Rótor da máquina assíncrona	32
2 Topologia dos rectificadores.....	33
2.1 Cálculo da bobine interfásica do paralelo dos rectificadores.....	41
3 Análise harmónica das correntes no estátor	44
4 Indutância de alisamento	46
5 Conclusões	50
Capítulo 4	
Conversão de corrente contínua em alternada	51
1 Inversor de corrente.....	52
1.1 Introdução	52
1.2 Regras para o controlo	54

1.3 Base de PWM.....	55
1.4 Implementação do PWM.....	60
1.5 Comando do inversor	64
1.5.1 Organização e armazenamento das tabelas de PWM	66
1.5.2 Mudança de estado	68
1.5.3 Mudança de índice de modulação.....	72
1.5.4 Adaptação do PWM às variações de frequência da rede eléctrica.....	73
1.5.4.1 Solução adoptada.....	74
1.5.4.2 Rotina <i>calcula_correcao_periodo()</i>	75
1.5.5 Sincronismo com a rede e controlo da fase.	76
1.5.5.1 Rotina <i>muda_fase_pwm(fase)</i>	79
1.5.5.2 Rotina <i>calcula_tempo_fase_atribui_T3()</i>	81
1.5.5.3 Rotina <i>acerta_fase_pwm()</i>	82
1.5.5.4 Inicialização, arranque e paragem do inversor	86
1.5.5.5 Comando do IGBT da protecção DC	86
1.6 Características do PWM.....	87
1.6.1 Harmónicos da corrente de saída	87
1.6.2 Tensão à entrada	93
1.6.3 Tensões aos terminais dos interruptores	97
1.7 Características do PWM implementado.....	98
2 Trânsito de energia activa e reactiva	100
2.1 Corrente I_{DC} independente do inversor	102
2.2 Corrente I_{DC} controlada pelo inversor	103
2.3 Aplicação no SRED	104
3 Descrição da montagem utilizada	106
4 Conclusões	108

Capítulo 5

Modelação do SRED, Conjunto Máquina assíncrona - Conversores	111
1 Introdução	111
2 Modelo da máquina assíncrona.....	112
3 Modelo do inversor e do filtro AC	113
4 Modelo dos rectificadores e do filtro DC.....	114
5 Modelo do SRED.....	116
5.1 Diagrama das potências em jogo no modelo.....	117
5.2 Potência transferida do estátor para o rotor (P_2)	117
5.3 Binário electromagnético	118
6 Características do SRED com imposição da tensão no barramento DC.....	118
6.1 Análise do sistema a partir do modelo	119
6.2 Características de funcionamento com imposição da tensão no barramento DC.....	121
6.2.1 Conclusões.....	128
7 Características do SRED com imposição da corrente no barramento DC	129
7.1 Análise do sistema a partir do modelo	129
7.2 Características de funcionamento sem limitação de V_{dc}	131
7.2.1 Conclusões.....	134
7.3 Características de funcionamento com limitação de V_{dc}	134
7.3.1 Conclusões.....	138
8 Arranque da máquina assíncrona	138

9 Gama de funcionamento como gerador	139
Capítulo 6	
Sistema de Comando.....	141
1 Especificação do Sistema de Comando.....	141
1.1 Autómato	142
1.2 Computador Pessoal	143
1.3 Operador local	143
1.4 Interacção com o SRED.....	144
1.4.1 Sensores.....	146
1.4.2 Actuadores.....	147
2 Plataforma de hardware.....	147
2.1 Plataforma utilizada.....	148
2.1.1 Microcontrolador SAB80C167	149
2.1.1.1 Endereçamento.....	150
2.1.1.2 Registos de processamento	151
2.1.1.3 Stack	152
2.1.1.4 Sistema de interrupções	153
2.1.1.4.1 Interrupções de sistema	154
2.1.1.4.2 Processamento normal de interrupções	155
2.1.1.4.3 PEC.....	155
2.1.1.5 Conversor analógico/digital.....	156
2.1.1.6 Entradas / Saídas digitais	157
2.1.2 MM167.....	157
2.1.3 Placa de interface	158
2.1.3.1 Condicionamento dos sinais analógicos	159
2.1.3.1.1 Tensão de referencia do conversor Analógico/Digital	160
2.1.3.1.2 Tensão e corrente DC	160
2.1.3.1.3 Tensões da rede	161
2.1.3.1.4 Correntes na rede e Correntes no rotor.....	162
2.1.3.2 Sinal de velocidade	163
2.1.3.3 Detecção da passagem por zero da tensão da rede.....	164
2.1.3.4 Comando dos disjuntores e contactores.....	165
2.1.3.5 Consola local para operador	166
2.1.3.6 Interfaces de comunicação	167
2.1.3.7 Sinais de alarme/protecção da máquina assíncrona	168
2.1.3.8 Alimentação do sistema de controlo	168
2.1.3.9 Inversor e circuito de protecção	169
3 Software.....	170
3.1 Sistema Operativo.....	171
3.2 Estrutura do software	172
3.2.1 Pré-escalonador e aquisição de medidas analógicas	173
3.2.2 Escalonador	176
3.2.3 Consola local.....	177
3.2.3.1 botões.....	177
3.2.3.2 Sinalização.....	179
3.2.3.3 Visualizador.....	179
4 Conclusões.....	180

Capítulo 7

Controladores do SRED	181
1 Introdução	181
2 Controlo da corrente no barramento DC	182
3 Controlo da potência trocada com a rede	188
4 Definição da potência a ser entregue à rede.....	192
4.1 Controlador para definição da potência a entregar à rede	194

Capítulo 8

Conclusões e Desenvolvimento futuro	195
--	------------

Bibliografia / Referências.....	199
--	------------

Anexo A

Adaptação do Controlador PID analógico a um controlador Digital.....	201
---	------------

Anexo B

Multiplicações não inteiras	205
--	------------

Anexo C

Código mais relevante	209
1 PWM.h Várias definições e prototipagem das funções que controlam o inversor.....	211
2 PWM.c Funções escritas em C para comando do inversor	213
3 PWM_V8.A66 Procedimentos escritos em <i>assembly</i> para comando do inversor.....	219
4 Exemplificação das tabelas para o PWM.....	227

Índice de figuras

Figura 2.1 - Esquema do sistema de coluna de água oscilante [5].	7
Figura 2.2 - Perfil da central [9].	8
Figura 2.3 - Esquema do conjunto turbina - gerador [9].	9
Figura 2.4 - Utilização de baterias de acumuladores para armazenar energia.	10
Figura 2.5 - A rede vista como um sistema de armazenagem para o gerador G1.	10
Figura 2.6 - Binário transmitido pela turbina ao gerador. (retirada da referência [5]).	11
Figura 2.7 - Binário da turbina e velocidade (retirada da referência [5]).	12
Figura 2.8 - Alternativas para um gerador de velocidade variável e frequência constante (VSCF).	14
Figura 2.9 - Esquemas para controlo de velocidade da máquina assíncrona de rotor bobinado através da variação da resistência rotórica.	15
Figura 2.10 - Características binário - velocidade em função da resistência rotórica.	16
Figura 2.11 - Princípio do sistema de recuperação da energia de deslizamento.	17
Figura 2.12 - SRED com ponte de díodos como conversor AC/DC e ponte a tirístores como conversor DC/AC.	18
Figura 2.13 - Arranque do SRED através de uma resistência auxiliar.	19
Figura 2.14 - Modelo por fase da máquina assíncrona.	19
Figura 2.15 - Modelo dos conversores.	20
Figura 2.16 - Modelação do SRED.	20
Figura 2.17 - Relação entre as potências do estator e do rotor face à mecânica.	22
Figura 2.18 - Relação entre as potências do estator e do rotor face à potência mecânica absoluta.	23
Figura 2.19 - Relação entre a potência mecânica e a potência absoluta do estator (eq.2.13).	24
Figura 2.20 - Relação entre a potência mecânica e a potência absoluta do estator (eq.2.15).	24
Figura 2.21 - Potências entregues à rede pela máquina (Pmec), pelo estator (P1) e pelo rotor (P2).	25
Figura 2.22 - Curva ideal de binário para o SRED.	26
Figura 2.23 - Curva de binário para o SRED.	26
Figura 2.24 - Regime de funcionamento se os conversores permitirem a injeção de energia no rotor.	27
Figura 2.25 - Esquema global do sistema de recuperação de energia de deslizamento usado neste projecto para o aproveitamento da energia das ondas.	27
Figura 3.1 - Esquema genérico da conversão da tensão com amplitude e frequência variáveis em corrente contínua.	32
Figura 3.2 - Esquema da montagem Paralela Dupla 3 (PD3) e respectivas formas de onda.	33
Figura 3.3 - Esquema da Série 3 (S3) e respectivas formas de onda.	34
Figura 3.4 - Harmónicos da corrente nos enrolamentos das montagens S3 e PD3.	34
Figura 3.5 - A montagem dos díodos de um rectificador trifásico é igual no caso de ser uma montagem Paralela Dupla ou Série.	35
Figura 3.6 - Esquema do efeito das correntes dos enrolamentos secundários no enrolamento primário.	35
Figura 3.7 - Associação de rectificadores para eliminar os 5º e 7º harmónicos da corrente no primário e forma de onda de corrente obtida.	36
Figura 3.8 - Harmónicos da corrente no enrolamento primário de uma montagem rectificadora com um S3 e um PD3.	37

Figura 3.9 - Montagem em paralelo dos dois rectificadores através de bobine interfásica para limitar a corrente de circulação.	38
Figura 3.10 - Montagem em série dos dois rectificadores.	39
Figura 3.11 - Esquema do conversor AC/DC usado.	40
Figura 3.12 - Forma de onda da tensão rectificadora total (V_{dc}) e das tensões geradas pelos dois rectificadores: PD3 e S3. V_c é a tensão eficaz composta da alimentação do estátor e s é o deslizamento.	40
Figura 3.13 - Modelação do paralelo de duas fontes de tensão.	41
Figura 3.14 - Equivalente da associação das indutâncias L_1 e L_2	41
Figura 3.15 - Forma de onda da tensão de saída dos dois rectificadores (PD3: $V_1(t)$ e S3: $V_2(t)$), diferença de tensão entre os dois ($V_d(t)$), e integral da diferença. V_c é a tensão eficaz composta da alimentação do estátor, s é o deslizamento e f_r a frequência de alimentação.	43
Figura 3.16 - Corrente total equivalente dos dois enrolamentos rotóricos.	45
Figura 3.17 - Frequência da corrente no estátor provocada pelo harmónico nh da corrente equivalente total dos dois enrolamentos do rotor.	46
Figura 3.18 - Esquema usado para obter o valor da indutância de alisamento	47
Figura 3.19 - Forma de onda típica da tensão gerada pelo conversor DC/AC à sua entrada. ($im=0.5$ e $\theta=0^\circ$).	47
Figura 3.20 - Formas de onda de $E_{dc}(t)$ e $\int (E_{dc}(t) - V_{dc}) dt$	49
Figura 3.21 - Andamento do valor de pico a pico (Δy) de $\int (E_{dc}(t) - V_{dc}) dt$ em função do índice de modulação.	50
Figura 4.1 - Esquema geral da conversão dc-ac.	51
Figura 4.2 - Esquema básico do inversor de corrente.	52
Figura 4.3 - Utilização normal do inversor de corrente.	52
Figura 4.4 - Modelação do inversor de corrente.	53
Figura 4.5 - Demonstração da necessidade de haver apenas 1 interruptor a conduzir nos grupos superior e inferior.	54
Figura 4.6 - Construção das moduladoras M_1 e M_2	55
Figura 4.7 - Operação de modulação.	56
Figura 4.8 - Inversor de corrente.	57
Figura 4.9 - Geração dos sinais de comando do inversor e correntes obtidas na saída para $im=1$ 58	58
Figura 4.10 - Geração dos sinais de comando do inversor e correntes obtidas na saída para $im=0.5$	59
Figura 4.11 - Geração dos sinais de comando do inversor e correntes obtidas na saída para $im=0.1$	60
Figura 4.12 - Forma de onda das correntes de saída para um controlo em onda quadrada e respectiva sequência de estados de controlo.	61
Figura 4.13 - Transições do sinal S_1 em função de P_1 e M_1	61
Tabela 4.1 - Sinais que devem ser aplicados no comando dos interruptores em função do intervalo de tempo respectivo.	62
Figura 4.14 - Obtenção do sinal de comando dos interruptores durante o primeiro 1/6 de período (T_1).	62
Tabela 4.2 - Constituição da tabela de controlo do inversor para o PWM usado neste trabalho. A frequência das portadoras é de 45 vezes a frequência das correntes de referência. Os tempos $d_1..d_{15}$ são função do índice de modulação.	63
Figura 4.15 - Modelo do módulo de <i>software</i> de comando do inversor.	65
Figura 4.16 - Tabela com a duração dos estados do PWM. Os 29 valores correspondem aos estados durante 1/6 de período que depois se repetem para os restantes 5/6. A tabela	

é percorrida no sentido descendente e o seu final é sinalizado com o valor FFFFh. Cada im possui uma tabela deste tipo que ocupa 60bytes.	67
Figura 4.17 - Organização das tabelas usadas na síntese do PWM.	68
Figura 4.18 - Esquema para realizar a sobreposição de condução.....	69
Figura 4.19 - Fluxograma usado na rotina <i>gera_pwm()</i> . Esta rotina é executada por interrupção quando o contador T6 chega a zero.	71
Figura 4.20 - Fluxograma usado para mudar o índice de modulação.	73
Figura 4.21 - Esquema básico para obtenção de frequência variável com um PWM tabelado.	74
Tabela 4.3 - Valores de frequência obtida em função do valor de correcção.	75
Figura 4.22 - Atraso nas interrupções da detecção de passagem por zero da tensão da rede provocadas pela filtragem.....	77
Figura 4.23 - Controlo do esfasamento entre a tensão da rede e a corrente gerada pelo inversor.....	77
Figura 4.24 - Fluxograma da interrupção <i>passagem_zero_rede()</i>	79
Figura 4.25 - Correspondência entre o valor de T3 e a fase.	80
Figura 4.26 - Compensação devido ao atraso provocado pelo filtro no circuito de detecção de passagem por zero da rede.....	80
Figura 4.27 - Fluxograma da rotina <i>muda_fase_pwm(fase)</i>	81
Figura 4.28 - Quantificação do nível de dessincronização do PWM.....	83
Figura 4.29 - Identificação do grupo do estado actual do PWM.	84
Figura 4.30 - Fluxograma da rotina <i>acerta_fase_pwm()</i>	85
Figura 4.31 - Espectro das correntes de saída do inversor para vários índices de modulação.	88
Figura 4.32 - Espectro relativo das correntes de saída do inversor para vários índices de modulação.....	89
Figura 4.33 - Espectro relativo das correntes de saída do inversor para vários índices de modulação (zoom das fig:4.32)	90
Figura 4.34 - Evolução da componente fundamental e dos harmónicos $nfp \pm 2$ e $nfp \pm 4$ com o índice de modulação.	91
Figura 4.35 - Evolução dos harmónicos $2.nfp \pm 1$, $2.nfp \pm 5$ e $2.nfp \pm 7$ com o índice de modulação.....	91
Figura 4.36 - Evolução dos harmónicos relativos (DB) do 13° até ao 49.	92
Figura 4.37 - Evolução dos harmónicos relativos (DB) do 53° até ao 67.	92
Figura 4.38 - Evolução dos harmónicos relativos (DB) do 71° até ao 97.	92
Figura 4.39 - Esquema utilizado para analisar a tensão à entrada do inversor	93
Figura 4.40 - - Forma de onda da tensão Vdc em função da tensão da rede e das correntes do inversor	94
Figura 4.41 - Comparação da tensão gerada à entrada do inversor para vários índices de modulação e esfasamentos.....	95
Figura 4.42 - Espectro e espectro relativo da tensão à entrada do inversor para fase=0° e vários índices de modulação.	96
Figura 4.43 - Evolução da componente contínua e dos principais harmónicos da tensão à entrada do inversor em função do índice de modulação para um esfasamento nulo.	96
Figura 4.44 - Evolução da componente contínua da tensão à entrada do inversor em função do esfasamento para vários índices de modulação.	97
Figura 4.45 - Forma de onda da tensão aos terminais dos interruptores do inversor.....	98
Figura 4.46 - Evolução dos harmónicos de corrente em função do índice de modulação.....	99
Figura 4.47 - Evolução dos harmónicos relativos de corrente em função do índice de modulação. ...	100
Figura 4.48 - Alimentação do inversor com uma corrente independente.	102
Figura 4.49 - Alimentação do inversor por uma fonte de tensão não controlada.	103
Figura 4.50 - Consumo de potência reactiva em função da corrente no barramento DC e em função da velocidade para vários valores de V _{DC}	105

Figura 4.51 - Dispositivos que implementam um interruptor: IGBT, diodo, supressor e <i>driver</i> isolado.....	106
Figura 4.52 - Esquema do inversor, protecção e envolvente de comando.	107
Figura 5.1 - Modelação do SRED.	111
Figura 5.2 - Modelo para representação da máquina assíncrona.	112
Figura 5.3 - Modelação do inversor do lado contínuo.	114
Figura 5.4 - Modelo mais completo do inversor do lado contínuo.	114
Figura 5.5 - Esquema do conjunto do paralelo dos rectificadores com o filtro DC.....	115
Figura 5.6 - Equivalente visto pelo lado AC dos rectificadores.....	116
Figura 5.7 - Modelo do SRED.....	116
Figura 5.8 - Diagrama das potências em jogo no modelo do SRED.	117
Figura 5.9 - Separação do modelo em dois circuitos e equivalente <i>NORTON</i> do circuito A.	119
Figura 5.10 - Esquema eléctrico mais simples do modelo do SRED.	120
Figura 5.11 - Fasores com a origem em \bar{I}_2	121
Figura 5.12 - Fasores com a origem na tensão da rede \bar{V}_1	121
Figura 5.13 - Andamento da corrente no barramento DC em função da velocidade para vários valores de V_{dc}	122
Figura 5.14 - Andamento da corrente no estátor em função da velocidade para vários valores de V_{dc}	122
Figura 5.15 - Andamento da potência absorvida pelo estátor em função da velocidade para vários valores de V_{dc}	123
Figura 5.16 - Andamento da potência transferida do estátor para o rotor em função da velocidade para vários valores de V_{dc}	123
Figura 5.17 - Andamento da potência entregue à rede pelos conversores em função da velocidade para vários valores de V_{dc}	123
Figura 5.18 - Andamento da potência total retirada à rede em função da velocidade para vários valores de V_{dc}	124
Figura 5.19 - Andamento da potência mecânica em função da velocidade para vários valores de V_{dc}	124
Figura 5.20 - Andamento do binário electromagnético em função da velocidade para vários valores de V_{dc}	124
Figura 5.21 - Andamento do potência reactiva absorvida pelo estátor em função da velocidade para vários valores de V_{dc}	125
Figura 5.22 - Andamento do factor de potência do estátor em função da velocidade para vários valores de V_{dc}	125
Figura 5.23 - Andamento da corrente do estátor em função da corrente no barramento DC.....	125
Figura 5.24 - Andamento da velocidade em função da corrente no barramento DC para vários valores de V_{dc}	126
Figura 5.25 - Andamento da potência total retirada à rede em função da corrente no barramento DC para vários valores de V_{dc}	126
Figura 5.26 - Andamento da potência mecânica em função da corrente no barramento DC para vários valores de V_{dc}	126
Figura 5.27 - Andamento da potência absorvida pelo estátor em função da corrente no barramento DC para vários valores de V_{dc}	127
Figura 5.28 - Andamento do binário em função da corrente no barramento DC.....	127
Figura 5.29 - Andamento da potência reactiva absorvida pelo estátor em função da corrente no barramento DC.....	127
Figura 5.30 - Andamento do factor de potência do estátor em função da corrente no barramento DC para vários valores de V_{dc}	128
Figura 5.31 - Controlador de corrente no barramento DC.	129
Figura 5.32 - Modelo simplificado do SRED.....	130

Figura 5.33 - Andamento de varias grandezas em função da velocidade para $I_{dc_{ref}}=500A$	131
Figura 5.34 - Andamento da corrente no barramento DC em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$	131
Figura 5.35 - Andamento da tensão no barramento DC em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$	132
Figura 5.36 - Andamento do binário em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$	132
Figura 5.37 - Andamento da potência absorvida pelo estátor em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$	132
Figura 5.38 - Andamento da potência total absorvida à rede em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$	133
Figura 5.39 - Andamento da potência mecânica em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$	133
Figura 5.40 - Andamento da corrente absorvida pelo estátor em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$	133
Figura 5.41 - Andamento da potência reactiva absorvida pelo estátor em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$	134
Figura 5.42 - Andamento de varias grandezas em função da velocidade para $I_{dc_{ref}}=300A$	135
Figura 5.43 - Andamento da corrente no barramento DC em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$	135
Figura 5.44 - Andamento da tensão no barramento DC em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$	135
Figura 5.45 - Andamento do binário em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$	136
Figura 5.46 - Andamento da potência absorvida pelo estátor em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$	136
Figura 5.47 - Andamento da potência total absorvida à rede em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$	136
Figura 5.48 - Andamento da potência mecânica em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$	137
Figura 5.49 - Andamento da corrente absorvida pelo estátor em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$	137
Figura 5.50 - Andamento da potência reactiva absorvida pelo estátor em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$	137
Figura 5.51 - Corrente no barramento DC no arranque da máquina em função da resistência equivalente dos filtros AC e DC e impedância de ligação à rede (Valores estimados com base nos parâmetros da máquina fornecidos pelo fabricante).	138
Figura 5.52 - Limites da potência que o SRED pode fornecer à rede em função da velocidade.	139
Figura 5.53 - Curvas limite de I_{dc} para os limites da potência que o SRED pode fornecer à rede em função da velocidade.	140
Figura 6.1 - Ambiente de interacção do Sistema de Comando do Sistema de Recuperação da Energia de Deslizamento para o aproveitamento da energia das ondas Oceânicas.	142
Figura 6.2 - Interface com o operador local.	144
Figura 6.3 - Esquema geral dos sensores e actuadores existentes.	146
Figura 6.4 - Esquema de blocos do microcontrolador	150
Figura 6.5 - Endereçamento via registos DPP.	151
Figura 6.6 - Estrutura dos registos de operação: SFR.	152
Figura 6.7 - Protecção da <i>system stack</i> a acessos ilegais.	153
Figura 6.8 - Registo individual de controlo das interrupções do C167 (interrupção nº xx).	153
Figura 6.9 - Registo especial PSW (Processor Status Word) do C167.	154
Figura 6.10 - Registo de controlo do canal “x” de transferência via PEC.	155
Figura 6.11 - Esquema de Blocos da Placa de Interface	159
Figura 6.12 - Relações entre as medidas e as portas do conversor A/D do C167.	159

Figura 6.13 - Circuito gerador de referências	160
Figura 6.14 - Condicionamento da medida da corrente no barramento DC.....	160
Figura 6.15 - Diagrama de blocos do sistema de medida e relação entre a corrente I_{dc} e a palavra digital (PD) resultante da conversão A/D.....	160
Figura 6.16 - Condicionamento da medida da tensão no barramento DC.....	161
Figura 6.17 - Diagrama de blocos do sistema de medida e relação entre a tensão U_{dc} e a palavra digital (PD) resultante da conversão A/D.....	161
Figura 6.18 - Condicionamento da medida da tensão na rede (por fase).....	161
Figura 6.19 - Diagrama de blocos do sistema de medida e relação entre as tensões da rede e a palavra digital (PD) resultante da conversão A/D.....	162
Figura 6.20 - Condicionamento das medidas de corrente.....	162
Figura 6.21 - Diagrama de blocos do sistema de medida.....	163
Figura 6.22 - Relação entre as correntes do rotor e a palavra digital (PD) resultante da conversão A/D.....	163
Figura 6.23 - Relação entre as correntes da rede e a palavra digital (PD) resultante da conversão A/D.....	163
Figura 6.24 - Esquema de condicionamento do sinal de medida de velocidade.....	164
Figura 6.25 - Circuito de detecção da passagem por zero da tensão da fase R da rede.....	164
Figura 6.26 - Formas de onda do circuito de detecção da passagem por zero da tensão da fase R da rede.....	165
Figura 6.27 - Esquema genérico do comando e monitorização dos disjuntores e contactores.....	166
Figura 6.28 - Ligação do display ao MM167.....	166
Figura 6.29 - Ligação dos <i>leds</i> ao MM167.....	167
Figura 6.30 - Ligação dos botões ao MM167.....	167
Figura 6.31 - Esquema das comunicações com o exterior.....	168
Figura 6.32 - Alarmes da máquina assíncrona.....	168
Figura 6.33 - Circuito de alimentação DC.....	168
Figura 6.34 - Mapa de memória para os resultados das conversões A/D.....	174
Figura 6.35 - Sequência de execução do pré-escalador e escalador.....	175
Figura 6.36 - Fluxograma do pré-escalador.....	176
Figura 6.37 - Esquema do buffer utilizado para os botões da consola local.....	177
Figura 6.38 - Fluxograma para a captura dos botões e escrita no buffer.....	178
Figura 6.39 - Fluxograma para as rotinas acederem aos botões que foram premidos pelo operador.....	179
Figura 7.1 - Esquema equivalente do barramento DC.....	182
Figura 7.2 - Evolução no tempo da aquisição das amostras, do cálculo das medidas e da execução da rotina de controlo da corrente.....	182
Figura 7.3 - Variação da corrente I_{dc} em função de $V_{dc_{inv}}$	183
Figura 7.4 - Estrutura do controlador PID analógico aplicado ao SRED para controlo da corrente I_{dc}	183
Figura 7.5 - Estrutura do controlador PID digital aplicado ao SRED para controlo da corrente I_{dc}	184
Figura 7.6 - Limitação de $V_{dc_{inv}}$ à zona estável da curva binário / velocidade.....	185
Figura 7.7 - Influência da largura da janela de limitação de im.....	185
Figura 7.8 - Influência do sinal da potência trocada com a rede no controlo do SRED.....	188
Figura 7.9 - Uso de um PID para calcular a corrente de referência.....	189
Figura 7.10 - Controlo da potência em malha aberta através do cálculo da corrente de referência no barramento DC.....	189