



UNIVERSIDADE DA MADEIRA

15/D/2007

TESE DE DOUTORAMENTO

apresentada na  
Universidade da Madeira

Para obtenção do grau de Doutor

José Carlos Magro Esteves

Optimização de Sistemas Híbridos Fotovoltaicos-Eólicos  
em Zonas Insulares de Diversidade Climática-Arquipélago da Madeira

Júri:

Presidente:

Doutor Pedro Telhado Pereira

Reitor da Universidade da Madeira

Vogais:

Doutor Eduardo Lorenzo Pigueiras

Professor Catedrático da Universidade  
Politécnica de Madrid

Doutor Manuel Vázquez Vázquez

Professor Catedrático da Universidade de  
Vigo

Doutor António Manuel Barros Gomes Vallêra

Professor Catedrático da Faculdade de  
Ciências da Universidade de Lisboa

Doutor Mikhail Benilov

Professor Catedrático da Universidade da  
Madeira

Doutor António Luiz Moura Joyce

Director do Departamento de Energias  
Renováveis do Instituto Nacional de  
Engenharia e Tecnologia Industrial

Doutor João Luís Vieira Alves e Sousa

Investigador Auxiliar do Laboratório  
Regional de Engenharia Civil

Doutor Mário Dionísio Cunha

Professor Auxiliar da Universidade da  
Madeira



UNIVERSIDADE DA MADEIRA

15/D/2007

TESE DE DOUTORAMENTO

apresentada na  
Universidade da Madeira

Para obtenção do grau de Doutor

José Carlos Magro Esteves

Optimização de Sistemas Híbridos Fotovoltaicos-Eólicos  
em Zonas Insulares de Diversidade Climática-Arquipélago da Madeira

Júri:

Presidente:

Doutor Pedro Telhado Pereira

Reitor da Universidade da Madeira

Vogais:

Doutor Eduardo Lorenzo Pigueiras

Professor Catedrático da Universidade  
Politécnica de Madrid

Doutor Manuel Vázquez Vázquez

Professor Catedrático da Universidade de  
Vigo

Doutor António Manuel Barros Gomes Vallêra

Professor Catedrático da Faculdade de  
Ciências da Universidade de Lisboa

Doutor Mikhail Benilov

Professor Catedrático da Universidade da  
Madeira

Doutor António Luiz Moura Joyce

Director do Departamento de Energias  
Renováveis do Instituto Nacional de  
Engenharia e Tecnologia Industrial

Doutor João Luís Vieira Alves e Sousa

Investigador Auxiliar do Laboratório  
Regional de Engenharia Civil

Doutor Mário Dionísio Cunha

Professor Auxiliar da Universidade da  
Madeira



À minha esposa Isabel e filhote André pelo apoio,  
estímulo e sobretudo pela paciência.

## AGRADECIMENTOS

A tese que se apresenta não teria sido possível sem a colaboração de várias pessoas e entidades, ao longo de muitos anos, a quem gostaria de expressar o meu sincero agradecimento, bem como prestar homenagem aos que já partiram.

Ao Secretário Regional do Equipamento Social, Eng. Luís Manuel dos Santos Costa, desejo agradecer as condições facultadas para a realização deste trabalho, nomeadamente através do apoio institucional.

Ao Eng. Delfino Gonçalves, ex-Director do LREC, e Eng. Daniel Figueira da Silva actual Director do LREC quero agradecer o apoio institucional para o desenvolvimento deste projecto.

Ao Eng. António Costa, primeiro Director do LREC, defensor das energias renováveis, gostaria de agradecer, de forma reconhecida, a cuidada transmissão de uma escola de pensamento e de trabalho que contribuíram de forma decisiva para a minha formação académica e profissional, não esquecendo a amizade.

Ao Professor Catedrático Doutor Manuel Vazquez Vazquez, da Universidade de Vigo, Director do Laboratório de Energia Solar e Presidente da Sociedade Espanhola de Energia Solar, queria manifestar o meu apreço pela forma como me recebeu no Laboratório de Energia Solar da Universidade de Vigo e me orientou durante o desenvolvimento desta tese. O seu estímulo académico e profissional transmitiu-me sempre um forte entusiasmo e uma vontade de continuar, factores indispensáveis que queria aqui deixar expressamente agradecidos, não esquecendo as inúmeras provas de amizade.

Ao Doutor Eng. João Alves e Sousa, Investigador do LREC e Director do Centro de Metrologia, co-orientador desta tese, quero agradecer toda a orientação que me deu no desenvolvimento deste trabalho, pela total disponibilidade, por todos os esclarecimentos científicos e conselhos, pelas inúmeras provas de amizade.

Ao apoio e estímulo do Professor Mikhail Benilov, Director do Departamento de Física da Universidade da Madeira, que desde a primeira hora aprovou este projecto.

Ao Dr. César Gundersen Pestana, Director Regional do Instituto de Meteorologia, pelo apoio e disponibilização dos dados das estações meteorológicas da Região, não esquecendo o Técnico João José, pela preciosa e sempre rápida ajuda no fornecimento e tratamento de dados do IM.

Aos Vigilantes da Natureza do PNM em serviço nas Selvagens e Desertas que, por vezes, em condições de trabalho árduo e de difícil execução sempre me ajudaram com espírito de missão e entusiasmo na montagem de sistemas energéticos em locais de difícil acesso.

Finalmente, aos colegas do DER, DRNH e DHTE, com os quais e graças aos quais, tenho atingido vários níveis de formação técnica e científica, permitam-me que lhes diga Muito Obrigado.

Com enorme gratidão, estarão sempre todos presentes:

Henrique Teixeira de Sousa, João Teixeira, Eleutério Faria, Pedro Carreira, Jorge Martins, Agostinho Gouveia e Jorge Tristão, Carlos Neves, Sérgio Lopes e Amélia do Rosário

Este projecto foi apoiado através de uma Bolsa Individual de Formação, financiada através da Direcção Regional de Formação Profissional (DRFP), no âmbito do POPRAM III (vertente FSE) e gerido pelo Centro de Ciências e Tecnologia da Madeira -CITMA



## PREFÁCIO

O trabalho apresentado nesta tese refere-se a um estudo de investigação sobre vários aspectos relacionados com a optimização de sistemas híbridos fotovoltaicos-eólicos em zonas insulares de diversidade climática do arquipélago da Madeira. Foi realizado no período de 2002 a 2007 no Laboratório Regional de Engenharia Civil e com algumas deslocações ao Laboratório de Energia Solar da Universidade de Vigo. Trata-se de um estudo de natureza multidisciplinar, suportado pelas áreas de conhecimento da física, matemática, meteorologia/climatologia, tecnologia dos equipamentos energéticos e economia. Como resultado final e após a criação de uma base de dados climáticos para o efeito, determinaram-se os dias característicos de radiação solar e temperatura para cada um dos doze meses do ano nas seis estações estudadas. O conhecimento dos dias característicos é também de grande utilidade para a elaboração de outros estudos. Seguidamente obtiveram-se as produções optimizadas fotovoltaicas-eólicas nas seis estações, utilizando um novo conceito que relaciona a produção de electricidade por metro quadrado de terreno horizontal referente à área dos módulos fotovoltaicos e à área de afectação dos aerogeradores. Este novo conceito permite facilmente comparar sistemas energéticos com diferentes tecnologias utilizando também diferentes fontes energéticas.

A obtenção e tratamento de dados climáticos permitiu também colaborar na elaboração do Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade de Vigo, constituindo uma importante ferramenta de trabalho para estudos e projectos de aproveitamento de energia solar, nomeadamente térmica, passiva e fotovoltaica.

Para a realização do estudo foi necessário dispor de vários anos de dados climáticos (2002-2005), pelo que os resultados só este ano puderam ser apresentados e deste modo as publicações de apresentação dos mesmos ficaram condicionadas a essa data.

Contudo, colaboramos na elaboração de artigos que foram apresentadas ao Solar World Congreso-SWC-2007 a realizar em Setembro em Beijing, China, organizado pela Internacional Solar Energy Society tendo os mesmos sido aceites para publicação.

Os artigos são os seguintes:

*Optimization of Hybrid PV-Wind Systems in Six Climatic Areas of the Madeira, Archipelago* - Magro C., M. Vazquez and P. Izquierdo;

*Characterization of the Daily Evolution of Global Solar Radiation and Temperature in Six Climatic Areas of the Madeira Archipelago*-Izquierdo P., M. Vazquez, and C. Magro;

Monthly and Yearly Maps of Daily Average Global Solar Radiation of the Madeira Archipelago (Portugal), obtained from Meteosat Images and Six Meteorological Stations, Vazquez M., P. Izquierdo, J. M. Santos, M. T. Prado, and C. Magro;

*Evaluation of the Solar Photovoltaic Energy Potential in Six Climatic Areas of the Madeira Archipelago* (Portugal) Vazquez M., C. Magro, P. Izquierdo and Sousa A.

No decorrer da tese foram apresentados em congressos, seminários e conferências alguns trabalhos dos quais se destacam:

*Sistemas Fotovoltaicos e Híbridos na Gestão e Desenvolvimento Sustentado das Reservas Naturais da Madeira* - CIES- 2002- XI Congresso Ibérico e VI Congresso Ibero-Americano de Energia Solar- Sociedade Portuguesa de Energia Solar-ISES- Algarve-Portugal

*A Energia Fotovoltaica na gestão e desenvolvimento sustentado das reservas naturais de Madeira*, 2003- Revista Ilenha, 25/12/2003- Direcção Regional dos Assuntos Culturais - Secretaria Regional do Turismo e Cultura.

*A Problemática de Utilização de Sistemas Fotovoltaicos e Híbridos em Zonas Insulares de Diversidade Climática* - CIES-2004 XII Congresso Ibérico e VII Congresso Ibero-Americano de Energia Solar-AEES-Associação Espanhola de Energia Solar-ISES-Vigo-Espanha

*Implementação de Redes Meteorológicas da Energia no Arquipélago da Madeira*- LREC- Magro, J. C., Neves, J. C., Silva, S.L., 2006 - XI Congresso Ibérico e VI Congresso Ibero-Americano de Energia Solar-Lisboa CIES06.

## RESUMO

Nesta tese apresento um estudo detalhado sobre vários aspectos relacionados com a optimização de sistemas híbridos fotovoltaicos-eólicos em zonas insulares de diversidade climática-arquipélago da Madeira que foi desenvolvido no Laboratório Regional de Engenharia Civil e com algumas deslocações no Laboratório de Energia Solar da Universidade de Vigo entre 2002 e 2007. Foi baseado nos conhecimentos adquiridos ao longo de 25 anos de prática profissional de estudo, projecto, montagem e monitorização de tecnologias solares e eólicas, para produção de electricidade em locais isolados, bem como pesquisa e análise climatológica. Como resultado final e após a criação de uma base de dados climáticos para fins energéticos, determinámos os dias característicos de radiação solar e temperatura para cada um dos doze meses do ano, nas seis estações meteorológicas estudadas. Estes dias são de grande utilidade também para a elaboração de outros estudos. Após o tratamento dos dados constatou-se que a evolução das temperaturas ao longo do ano, tanto no caso das médias como nas médias dos valores máximos e nas médias dos valores mínimos, segue uma tendência similar em todas as estações. Concluimos que, a altitude é o factor determinante nestas diferenças, de tal maneira que quanto maior for a altitude menor são, em geral, as temperaturas médias. No estudo da irradiação global constatámos que na ilha do Porto Santo há mais 4% de radiação solar que na ilha da Madeira. Já na costa norte da Madeira, mais precisamente em São Jorge a média diária mensal e anual é inferior em cerca de 16.5 % em relação ao Porto Santo. Contudo, a costa sul da Madeira apresenta valores de radiação interessantes para o aproveitamento energético. Na abordagem à produção fotovoltaica e eólica, desenvolvemos um novo conceito que relaciona a produção eléctrica por metro quadrado de terreno horizontal, referente à área dos módulos fotovoltaicos e à área de afectação dos aerogeradores. Este novo conceito permite facilmente comparar sistemas energéticos diferentes utilizando diferentes recursos energéticos, permitindo também comparar a energia eléctrica produzida com a energia solar recebida e, deste modo, extrapolar os resultados para a toda a superfície do arquipélago. Finalmente, no que diz respeito à optimização de sistemas híbridos fotovoltaicos-eólicos nas seis zonas climáticas do arquipélago da Madeira, calculámos a produção eólica diária e a produção média diária para cada um dos doze meses do ano, bem como a média anual, isto por metro quadrado de área varrida pelo rotor do aerogerador, para que os resultados se pudessem comparar com os

resultados anteriormente obtidos na produção fotovoltaica, reportados também a metro quadrado de área de módulo.

No que concerne à produção máxima e comparativa de sistemas (*100% fotovoltaicos e 100% eólicos*), estudámos várias hipóteses para que os resultados fossem os mais gerais possíveis, tendo-se chegado à conclusão de que se se relacionar a procura de energia/consumo com a produção anual do sistema híbrido, não é necessário fazer a simulação dos sub-sistemas fotovoltaicos-eólicos em tamanho real, bastando apenas conhecer a proporção exacta destes, e extrapolar os resultados obtidos em percentagem para qualquer dimensão.

Da análise comparativa dos resultados da produção energética das diferentes composições percentuais fotovoltaico-eólico, podemos avaliar facilmente o grau de cobertura de energia renovável. Conhecidas as percentagens de cobertura da procura que se obtêm com energias renováveis, é possível definir com segurança as percentagens solar-eólica que oferecem as melhores opções técnicas. Em termos de optimização técnica, concluímos que o único factor que diferencia um sistema híbrido de outro, nos 6 locais estudados, é a área do módulo fotovoltaico e a área varrida pelo rotor do aerogerador. Finalmente, concluímos que os custos das instalações híbridas e do kWh renovável produzido nos locais estudados, diminuem em todos os locais ao diminuir a percentagem do sub-sistema eólico no sistema híbrido fotovoltaico-eólico, sendo o custo mais baixo reportado sempre à *Instalação toda solar (100% fotovoltaica)*.

## **Palavras Chave**

Interacção temperatura - radiação solar

vento

energia fotovoltaica

energia eólica

sistemas híbridos

produção fotovoltaica/eólica/por metro quadrado

## ABSTRACT

In this thesis a detailed study concerning the various aspects related to the “Optimization of hybrid systems PV-W (photovoltaic-wind) in islands of climatic diversity” is presented. The work was developed in the Regional Laboratory of Civil Engineering (LREC) of Madeira in conjunction with the Solar Energy Laboratory of the University of Vigo, Spain, between 2002 and 2007. It is based on expertise knowledge acquired during 25 years of professional practice encompassing the study, design, assembly and monitoring of photovoltaic and wind technologies for the production of electricity in remote locations, as well as climatic research and analysis. At the end, and as the result of building a climatic data basis for energy purposes, characteristic days of solar radiation and temperature for each month of the year were determined, in all the six weather stations studied. Data analysis showed that temperature variation, in both the overall average and the average of maximum and minimum values, follows a similar trend in all stations. It was concluded that altitude is the predominant factor in those differences, in as much as the greater the altitude the lower will be, in general, the average temperatures. In the study of global irradiation the Porto Santo island showed an excess of 4 % of solar radiation than Madeira island, whereas in the north coast of Madeira, in São Jorge, the monthly and annually daily average is 16.5 % lower in relation to the Porto Santo figure. Nevertheless, the south coast presents reasonable values of radiation for the purpose of its use as an energy resource. In the approach to the production of wind and photovoltaic energy, a new concept was developed relating the electric production per square meter of horizontal land, with respect to the photovoltaic modules area and the wind generators allocated area. This new concept allows the different energy systems using different energy resources to be easily compared, permitting also to compare the electric energy produced with the received solar energy and thus, extrapolate the results for the entire area of the archipelago. Finally, in what concerns the “Optimization of hybrid PV-W systems in the six climatic zones of the Madeira archipelago”, the daily wind production and the daily average production for each month of the year was calculated, as well as the annual average per square meter of swept area by the wind generator rotor, so that the results could be compared with the results previously obtained for the PV production, also reported to the square meter of module area. Regarding the maximum energy production for each combination of systems (from 100 % PV to 100 % W), several arrangements were tested so

that the results could be generalized, leading to the conclusion that if one relates the demand of energy/consumption with the annual production of the hybrid system, it is not necessary to simulate the subsystems (PV-W) in its actual size, being sufficient to know the exact proportion of them and to extrapolate the results obtained, in percentage, to any other size.

From the comparative analysis of the energy production of different PV-W percent compositions, it is an easy task to evaluate the renewable energy cover factor. When the percentage renewable energy cover factor of the demand is known, it is possible to safely define the solar/wind percentages that represent the best technical option. In terms of technical optimization, it was concluded that the only factor that distinguishes a hybrid system from the other, in the six locations studied, is the area of photovoltaic module and the swept area of the wind generator rotor. Finally, we have concluded that the costs of hybrid installations and renewable kWh produced, in the locations studied, diminish in all locations with diminishing percentage of wind subsystem in the PV-W hybrid system, being the lower costs always related to an *all solar installation* (100 % photovoltaic).

## **KEYWORDS**

Temperature/Solar radiation interaction

Wind

Photovoltaic energy

Wind energy

Hybrid systems

Photovoltaic/Wind per square meter production

# ÍNDICE GERAL

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>iv</b>
<b>Prefácio</b> .....	<b>vi</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>viii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>x</b>
<b>Índice Geral</b> .....	<b>xii</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>xix</b>
<b>Índice de Siglas de Instituições e Outros</b> .....	<b>xxi</b>
<b>1. Aproveitamento Energético no Arquipélago da Madeira</b> .....	<b>2</b>
1.1 Evolução histórica do aproveitamento energético dos recursos endógenos no arquipélago da Madeira .....	2
1.1.1 Energia do vento .....	2
1.1.2 Energia da biomassa florestal .....	4
1.1.3 Energia hídrica .....	5
1.1.4 Energia do biogás .....	8
1.1.5 Energia das ondas do mar .....	9
1.1.6 Energia solar .....	10
1.2 Aproveitamento de recursos energéticos endógenos para produção de electricidade – situação actual .....	13
1.2.1 Energia das ondas do mar .....	13
1.2.2 Energia da biomassa florestal .....	13
1.2.3 Energia hídrica .....	14
1.2.4 Energia eólica .....	16
1.2.5 Energia dos resíduos sólidos urbanos .....	17
1.2.6 Energia solar .....	19
1.3 Caracterização do sector electroprodutor do arquipélago da Madeira .....	23
1.3.1 Potência eléctrica instalada e produção .....	23
1.3.2 Rede de transporte e distribuição de energia eléctrica .....	26
1.3.3 Procura de electricidade .....	27
1.3.4 Perspectivas de evolução do sistema electroprodutor .....	29
<b>2. Contributo para o desenvolvimento das energias renováveis no arquipélago da Madeira</b> .....	<b>32</b>
2.1 Generalidades .....	32
2.2 Participação em estudos e projectos de I&D .....	34
2.2.1 Programas de anemometria para fins energéticos .....	34
2.2.2 Estudos e projectos de aproveitamento de energias renováveis .....	43
2.2.3 Estudo da energia das ondas do mar .....	46

2.2.4	Estudo de viabilidade de produção de biogás.....	46
2.2.5	Projecto EULER XXI - Edifício unidade laboratorial de energias renováveis ..	47
2.3	Instalação de sistemas fotovoltaicos e híbridos.....	47
2.3.1	Instalação de sistemas fotovoltaicos.....	47
2.3.2	Instalação de sistemas híbridos (fotovoltaico-eólico) .....	56
2.4	Estudo e implementação de redes meteorológicas .....	62
2.4.1	Redes Meteorológicas do LREC .....	62
2.4.2	Características dos instrumentos de medição meteorológica .....	66
2.4.3	Concepção e aplicação de modelos de procedimentos de recolha e tratamento de dados .....	68
2.4.4	Criação de uma base de dados na Internet.....	68
<b>3.</b>	<b>Base de dados da tese .....</b>	<b>71</b>
3.1	Bases de dados meteorológicos disponíveis no arquipélago da Madeira.....	71
3.1.1	Base de dados do LREC .....	71
3.1.2	Base de dados do Instituto de Meteorologia.....	73
3.1.3	Metodologia da utilização da base de dados .....	75
3.2	Características básicas dos equipamentos das estações .....	76
<b>4.</b>	<b>Tratamento e análise de dados .....</b>	<b>78</b>
4.1	Dias característicos de radiação solar global.....	78
4.1.1	Base de dados de radiação solar .....	78
4.1.2	Radiação solar médias diárias mensais e anual .....	79
4.1.3	Dias característicos de radiação solar global de cada mês .....	81
4.2	Dias característicos de temperatura.....	89
4.2.1	Base de dados de temperatura .....	89
4.2.2	Temperaturas médias mensais e anual .....	90
4.2.3	Dias característicos de temperatura de cada mês.....	94
<b>5.</b>	<b>Estimativa da produção fotovoltaica em seis estações .....</b>	<b>103</b>
5.1	Instalação fotovoltaica tipo .....	103
5.2	Definição da instalação fotovoltaica .....	103
5.3	Características da instalação fotovoltaica.....	105
5.3.1	Características do módulo fotovoltaico .....	105
5.3.2	Modelo matemático da característica $I-V$ do módulo fotovoltaico.....	107
5.3.3	Simplificações do modelo matemático da característica $I-V$ do módulo fotovoltaico.....	108
5.3.4	Método simplificado para o cálculo da potência máxima do módulo.....	109
5.3.5	Cálculo da potência máxima do módulo para qualquer valor de radiação e temperatura .....	111

5.4	Produção fotovoltaica máxima mensal e anual .....	111
<b>6.</b>	<b>Optimização de sistemas híbridos fotovoltaicos-eólicos em seis zonas climáticas do arquipélago da Madeira.....</b>	<b>116</b>
6.1	Introdução.....	116
6.2	Base de dados .....	116
6.3	Definição das características do sistema eólico tipo .....	116
6.4	Produção do sistema eólico tipo .....	117
6.4.1	Determinação das velocidades do vento à altura do aerogerador.....	117
6.4.2	Distribuição de frequências de Weibull.....	119
6.4.3	Produção eólica máxima média diária mensal e anual .....	120
6.5	Optimização técnica dos sistemas híbridos fotovoltaicos eólicos não conectados à rede eléctrica.....	123
6.5.1	Definição do sistema híbrido tipo. Hipóteses.....	123
6.5.2	Produção máxima e comparativa dos sistemas todo-solar (100 % fotovoltaico) e todo-eólico (100 % eólico) .....	125
6.5.3	Operação e balanço energético do sistema híbrido fotovoltaico-eólico .....	127
6.5.4	Evolução temporal dos fluxos energéticos .....	132
6.5.5	Resultados da optimização técnica.....	133
6.6	Optimização económica dos sistemas híbridos fotovoltaicos-eólicos não conectados à rede eléctrica.....	137
<b>7.</b>	<b>Conclusões e sugestões de investigação.....</b>	<b>143</b>
7.1	Conclusões.....	143
7.2	Sugestões de investigação .....	148
<b>8.</b>	<b>Referências e Bibliografia Complementar .....</b>	<b>151</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>166</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Moinho giratório de madeira, tradicional do Porto Santo.....	3
Figura 1.2 Porto Santo, pormenor de montagem do primeiro parque eólico de Portugal.....	3
Figura 1.3 Posto de observação de baleias-aerodínamo .....	4
Figura 1.4 Utilização de lenha para cozedura do vime.....	5
Figura 1.5 Turbina em madeira de moinho de água. Museu Etnográfico da Madeira .....	6
Figura 1.6 Levadas da ilha da Madeira.....	7
Figura 1.7 Origem da produção de electricidade - ilha da Madeira, 1953-2006.....	8
Figura 1.8 Biodigestores - Jardim Botânico do Funchal, 2000 .....	9
Figura 1.9 Projecto Pêndulo- produção de energia das ondas.....	9
Figura 1.10 Casa típica de S. Jorge .....	10
Figura 1.11 Casa típica do Porto Santo .....	10
Figura 1.12 Casa Solar do Porto Santo.....	11
Figura 1.13 Vivenda Schafer .....	11
Figura 1.14 Instalação solar térmica, Centro de Floricultura, Lugar de Baixo -1983 .....	12
Figura 1.15 Selvagem Grande, primeira instalação fotovoltaica de Portugal -1983.....	12
Figura 1.16 Evolução da produção hídrica e taxa de participação .....	15
Figura 1.17 Central hídrica da Ribeira da Janela, EEM.....	15
Figura 1.18 Central de fins múltiplos da EEM - Ribeira dos Socorridos.....	16
Figura 1.19 Parque eólico do Caniçal.....	17
Figura 1.20 Parque eólico do Porto Santo .....	17
Figura 1.21 Evolução da produção de energia eólica na RAM.....	18
Figura 1.22 Turbina da instalação de incineração da Meia Serra.....	18
Figura 1.23 a: Comparação anual dos valores mensais da temperatura do ar em quatro locais distintos da ilha da Madeira e b: Comparação anual dos valores mensais da humidade relativa do ar em quatro locais distintos da ilha da Madeira .....	20
Figura 1.24 Instalação solar térmica comparticipada pelo SIEST.....	21
Figura 1.25 Evolução das instalações comparticipadas pelo SIEST, 2000-2005.....	22
Figura 1.26 Banco de ensaios de colectores solares térmicos do LREC.....	22
Figura 1.27 Projecto PAUER, indicação do investimento .....	24
Figura 1.28 Localização das centrais eléctricas do arquipélago da Madeira.....	24
Figura 1.29 Origem da produção de electricidade na RAM, 1953-2006 .....	25
Figura 1.30 Produção de electricidade na RAM, 2005.....	25
Figura 1.31 Produção de electricidade na ilha da Madeira, 2005.....	26
Figura 1.32 Produção de electricidade na ilha do Porto Santo, 2005.....	26
Figura 1.33 Rede de transporte de energia da RAM em média e alta tensão .....	28
Figura 1.34 Central térmica da Vitória, EEM .....	30
Figura 2.1 I Semana da Energia Solar da Madeira-1982.....	33
Figura 2.2 Pormenor de montagem, MD-01.....	35
Figura 2.3 Estação MD-06 Paúl Sul .....	35

Figura 2.4 Pormenor de recolha de dados de vento.....	37
Figura 2.5 Comparação da velocidade do vento em 4 estações .....	38
Figura 2.6 Caniçal, parque eólico e estação anemométrica MD-21 .....	39
Figura 2.7 Parques eólicos do Caniçal em 2001.....	42
Figura 2.8 Casa Solar do Porto Santo- fachada Sul.....	44
Figura 2.9 Entrada de ar – fachada Norte.....	44
Figura 2.10 Estação piloto de dessalinização solar - 1983 .....	45
Figura 2.11 Panorâmica da central dessalinizadora e turbina de recuperação de energia.....	45
Figura 2.12 Estação de recepção de dados .....	46
Figura 2.13 Lançamento do ondógrafo.....	46
Figura 2.14 Ilha Selvagem Grande .....	48
Figura 2.15 Instalação fotovoltaica e destilador solar, Selvagem Grande, 1985.....	48
Figura 2.16 Regulador de carga e conversor, 12V/24V .....	49
Figura 2.17 Banco de baterias, 8 x 105 Ah .....	49
Figura 2.18 Selvagem Grande, visita de manutenção .....	50
Figura 2.19 Regulador de carga – 2005.....	50
Figura 2.20 Ilha Selvagem Pequena .....	52
Figura 2.21 Sistema monocristalino - 1996.....	52
Figura 2.22 Sistema policristalino 2006 .....	52
Figura 2.23 Casa do Sardinha, gerador fotovoltaico e banco de baterias.....	52
Figura 2.24 Instalações fotovoltaicas da Selvagem Grande, 2005 .....	53
Figura 2.25 Dia de Primavera, valores de tensão, corrente e radiação solar .....	54
Figura 2.26 Bica da Cana, gerador fotovoltaico, banco de baterias, reguladores e inversor....	54
Figura 2.27 Sistemas solares fotovoltaico e térmicos (ar e água) .....	55
Figura 2.28 Secador Solar-Prazeres, Quinta Pedagógica .....	55
Figura 2.29 Banco de Baterias.....	55
Figura 2.30 Vista aérea da Deserta Grande .....	57
Figura 2.31 Encumeada, passagem de nuvens N/S. ....	57
Figura 2.32 Deserta Grande, sistema híbrido -2002.....	58
Figura 2.33 Nova estação de vigilância e sistema híbrido da Deserta Grande, 2005.....	58
Figura 2.34 Sistema híbrido dos Estanquinhos .....	59
Figura 2.35 Fanal, sistema híbrido, inversor e reguladores.....	59
Figura 2.36 Aerogerador acidentado por ventos muito fortes .....	60
Figura 2.37 Degradação de módulo fotovoltaico- Deserta Grande.....	61
Figura 2.38 Transporte e desembarque de equipamento .....	61
Figura 2.39 Desembarque de baterias, Deserta Grande.....	62
Figura 2.40 Distribuição geográfica dos sistemas fotovoltaicos, híbridos e parques eólicos existentes na RAM .....	63
Figura 2.41 Concentrador da REMA localizado no LREC .....	65
Figura 2.42 Diagrama de Hardware – Base de Dados.....	68
Figura 2.43 Diagrama de Procedimentos - Recolha e Tratamento de dados .....	69
Figura 3.1 Localização das estações meteorológicas do IM no arquipélago de Madeira .....	74
Figura 3.2 Estações do LREC e IM localizadas na ilha da Madeira .....	76

Figura 4.1 Irradiação solar global diária média mensal em Wh/m <sup>2</sup> .dia para cada uma das estações analisadas no período 2002-2005 .....	80
Figura 4.2 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Janeiro	83
Figura 4.3 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Fevereiro .....	83
Figura 4.4 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Março.	84
Figura 4.5 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Abril...	84
Figura 4.6 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Maio...	85
Figura 4.7 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Junho .	85
Figura 4.8 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Julho ..	86
Figura 4.9 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Agosto	86
Figura 4.10 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Setembro .....	87
Figura 4.11 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Outubro .....	87
Figura 4.12 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Novembro .....	88
Figura 4.13 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Dezembro .....	88
Figura 4.14 Comparação no Funchal da distribuição sinusoidal do dia característico do mês de Abril, com a distribuição dos valores médios horários de radiação solar desse mesmo mês indicados na Tabela 4.2. ....	89
Figura 4.15 Evolução das temperaturas médias diárias mensais nas seis estações do Instituto de Meteorologia - período 2002-2005 .....	92
Figura 4.16 Evolução das temperaturas médias mensais das máximas diárias nas seis estações do Instituto de Meteorologia - período 2002-2005.....	92
Figura 4.17 Evolução das temperaturas médias mensais das mínimas diárias nas seis estações do Instituto de Meteorologia - período 2002-2005.....	93
Figura 4.18 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Janeiro ....	95
Figura 4.19 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Fevereiro	96
Figura 4.20 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Março .....	96
Figura 4.21 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Abril .....	97
Figura 4.22 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Maio .....	97
Figura 4.23 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Junho .....	98
Figura 4.24 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Julho .....	98
Figura 4.25 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Agosto ....	99
Figura 4.26 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Setembro	99
Figura 4.27 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Outubro	100
Figura 4.28 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Novembro .....	100
Figura 4.29 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Dezembro. ....	101

Figura 5.1 Curva característica I-V do módulo fotovoltaico.....	106
Figura 5.2 Circuito equivalente do módulo fotovoltaico.....	107
Figura 6.1 Potência do aerogerador em função da velocidade do vento .....	117
Figura 6.2 Esquema dum sistema híbrido fotovoltaico-eólico .....	127
Figura 6.3 Evolução da produção de energia na estação do Funchal no período 1/09/2002 a 31/10/2002.....	134
Figura 6.4 Evolução do estado de carga da bateria na estação do Funchal no período 1/09/2002 a 31/10/2002.....	134
Figura 6.5 Percentagem da cobertura dos sistemas fotovoltaico-eólico nas seis estações.....	135
Figura 6.6 Custos por ano de vida dos sistemas híbridos, em euros/sistema .....	139
Figura 6.7 Custo da energia de origem renovável produzida pelos sistemas híbridos em euros/kWh.....	140

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Centrais hidroeléctricas - 2005 .....	14
Tabela 1.2 Produção hídrica da ilha da Madeira-1996-2005.....	15
Tabela 1.3 Parques eólicos instalados na Madeira e Porto Santo 1985-2003 .....	17
Tabela 1.4 Evolução da produção eólica na RAM -1996-2005 GWh.....	17
Tabela 1.5 Energia eléctrica produzida na instalação de incineração da Meia Serra .....	18
Tabela 1.6 Rede de linhas de transporte e distribuição da EEM-2005.....	27
Tabela 1.7 Rede de subestações da EEM-2005 .....	27
Tabela 1.8 Rede de postos de transformação da RAM-2005 .....	27
Tabela 1.9 Evolução da procura de electricidade por áreas de consumo-2005 .....	28
Tabela 2.1 Velocidades médias anuais do vento da ilha do Porto Santo .....	34
Tabela 2.2 Localização das estações anemométricas - ilha da Madeira.....	36
Tabela 2.3 Programa PAIM-velocidade média mensal de vento, ilha da Madeira, 1988-1999 [un: m/s].....	37
Tabela 2.4 Medição de vento, zona S-SO - ilha da Madeira-1999 [ un:m/s] .....	40
Tabela 2.5 Medição de vento Caniçal – 1999 - programa EEM .....	40
Tabela 2.6 Listagem dos programas de anemometria- RAM-1982-2006 .....	41
Tabela 2.7 Características dos sistemas fotovoltaicos do LREC.....	51
Tabela 2.8 Características dos sistemas híbridos do LREC .....	60
Tabela 2.9 Redes meteorológicas do LREC.....	64
Tabela 2.10 Rede de anemometria – ANEM.....	66
Tabela 2.11 Rede de udometria – UDM.....	66
Tabela 2.12 Rede de temperatura, humidade do ar e radiação solar – THRS .....	66
Tabela 2.13 Rede de estações meteorológicas automáticas - REMA.....	66
Tabela 2.14 Características dos sensores da REMA .....	67
Tabela 3.1 Rede de estações meteorológicas automáticas do LREC .....	72
Tabela 3.2 Estações do LREC, Ano - 2006.....	72
Tabela 3.3 Variáveis meteorológicas registadas na REMA do LREC .....	73
Tabela 3.4 Estações do Instituto de Meteorologia no arquipélago da Madeira.....	73
Tabela 3.5 Variáveis de radiação solar, período 2002-2005, estações do IM .....	74
Tabela 3.6 Valores diários das variáveis meteorológicas registadas nas estações do IM .....	75
Tabela 4.1 Dias com lacunas, estações do IM (2002-2005).....	78
Tabela 4.2 Irradiação solar global diária média mensal e média anual em Wh/m <sup>2</sup> .dia -estações do IM - período 2002-2005 .....	79
Tabela 4.3 Dia médio de cada mês .....	81
Tabela 4.4 Temperaturas diárias registadas nas estações do IM .....	89
Tabela 4.5 Dias com dados de temperatura nas estações do IM do arquipélago da Madeira no período 2002-2005.....	90

Tabela 4.6a Temperaturas médias, média das máximas diárias, e média das mínimas diárias, mensais e anual, nas estações do IM no arquipélago da Madeira no período 2002-2005 .....	91
Tabela 4.6b Temperaturas médias, média das máximas diárias, e média das mínimas diárias, mensais e anual, nas estações do IM no arquipélago da Madeira no período 2002-2005	91
Tabela 5.1 Estimativa teórica da produção fotovoltaica máxima, média diária mensal e anual - estações do IM, período 2002-2005 .....	112
Tabela 5.2 Perdas de rendimento das instalações fotovoltaicas, expressas em forma de eficiência.....	114
Tabela 5.3 Estimativa real da produção fotovoltaica máxima em corrente contínua, média diária mensal e anual - estações do IM, período 2002-2005, (por metro <sup>2</sup> de superfície horizontal).....	114
Tabela 6.1 Velocidades médias do vento -estações do IM, período 2002-2005 .....	118
Tabela 6.2 Velocidades médias estimadas do vento - estações do IM - período 2002-2005 .	119
Tabela 6.3 Estimativa da produção do aerogerador, média diária mensal e anual, estações do IM, período 2002-2005 [aerogerador: 1000 W] .....	121
Tabela 6.4 Estimativa da produção do aerogerador, média diária mensal e anual, estações do IM, período 2002-2005, (por metro <sup>2</sup> de superfície varriada pelo rotor do gerador).....	122
Tabela 6.5 Estimativa da produção do aerogerador, médias diárias mensal e anual, estações do IM, período 2002-2005 (por metro <sup>2</sup> de superfície de terreno) .....	123
Tabela 6.6 Produção de energia, máxima média diária anual - instalação (100 % fotovoltaica), e instalação (100 % eólica), em 6 locais de estudo (por metro <sup>2</sup> de superfície de terreno) .....	126
Tabela 6.7 Metros quadrados de terreno afecto ao Aerogerador sobre o terreno que produzem a mesma energia anual que um metro quadrado de gerador FV, nos locais de estudo. ....	126
Tabela 6.8 Metros quadrados e diâmetro de rotor de Aerogerador sobre o terreno, que produz ao fim de um ano a mesma energia que um metro quadrado de módulo fotovoltaico.....	126
Tabela 6.9 Percentagem de cobertura fotovoltaico-eólico nos sistemas híbridos, para 6 estações.....	135
Tabela 6.10 Percentagens fotovoltaico-eólico e valor de taxa de cobertura que proporcionam as melhores opções técnicas .....	135
Tabela 6.11 Percentagem dum <i>Sistema todo-solar</i> com o mesmo grau de cobertura do consumo que um <i>Sistema híbrido</i> .....	136
Tabela 6.12 Custos totais por metro quadrado de terreno e ano do módulo fotovoltaico e o aerogerador .....	138
Tabela 6.13 Custos por ano de vida dos sistemas híbridos, em €/Sistema.....	138
Tabela 6.14 Energia de origem renovável produzida anualmente pelos sistemas híbridos, em kWh .....	139
Tabela 6.15 Custo da energia de origem renovável produzida pelos sistemas híbridos estudados, em euros/kWh.....	140

## ÍNDICE DE SIGLAS DE INSTITUIÇÕES E OUTROS

ADENE	Agência para a Energia
AEES	Associação Espanhola de Energia Solar
AREAM	Agência Regional de Energia e Ambiente
BEI	Banco Europeu de Investimentos
CAO	Coluna de Água Oscilante
CITMA	Centro de Ciência e Tecnologia da Madeira
DER	Divisão de Energias Renováveis
DHTE	Departamento de Hidráulica e Tecnologias Energéticas
DRA	Direcção Regional de Agricultura
DRCIE	Direcção Regional de Comércio, Indústria e Energia
DRF	Direcção Regional de Florestas
DRNH	Departamento de Recursos Naturais e de Hidráulica
DSHID	Direcção de Serviços de Hidráulica
DWIA	Danish Wind Industry Association
E	Eólico
EEM	Empresa de Electricidade da Madeira
EMA	Estação Meteorológica Automática
ERA Technology	Gabinete Inglês de Engenharia Energética
ERM-I&D	Projecto de Cooperação Luso-Alemão 1986
EULER	Edifício unidade laboratorial de energias renováveis-Século XXI
EWEA	European Wind Energy Association
FEDER	Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional
FV	Fotovoltaico
FV-E	Híbrido (fotovoltaico eólico)
GKSS	Centro de Investigação Tecnológica de Hamburgo
GR	Governo Regional da Madeira
IAEA	International Atomic Energy Agency
IBEK	Gabinete de Engenharia-Bremen
IGA	Investimentos e Gestão de Água da Madeira
IM	Instituto de Meteorologia
INETI	Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial
INMG	Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica
IPAT	Interdisziplinäre Projektgruppe für Angepasst Technologie
IST	Instituto Superior Técnico
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
LESUV	Laboratório de Energia Solar da Universidade de Vigo
LNETI	Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial
LREC	Laboratório Regional de Engenharia Civil
MD	Madeira
MOP	Ministério das Obras Públicas
p.e	Parque eólico
PAIM	Programa de Anemometria da Ilha da Madeira
PAIPS	Programa de Anemometria da Ilha do Porto Santo
PAUER	Projecto de Avaliação e Utilização de Energias Renováveis
PERAM	Plano Energético da Região Autónoma da Madeira
PNM	Parque Natural da Madeira
POPAM	Plano Operacional de Plurifundos da Madeira

PPERAM	Plano da Política Energética da Região Autónoma da Madeira
PRAM	Plano Regional da Água da Madeira - 2003
PS	Porto Santo
RAM	Região Autónoma da Madeira
RCCTE	Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios
REMA	Rede de Estações Meteorológicas Automáticas
RFA	República Federal da Alemanha
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios
SIEST	Sistema de Incentivos à Energia Solar Térmica
SPES	Sociedade Portuguesa de Energia Solar
SQL	Strutred Query Language
SRES	Secretaria Regional do Equipamento Social
SRRN	Secretaria Regional dos Recursos Naturais e Ambiente
tep	Tonelada equivalente de petróleo
THRS	Rede de temperatura, humidade e radiação solar
UDM	Rede de udometria
UE	União Europeia
UMa	Universidade da Madeira
UTB	Universidade Técnica de Berlim
UV	Universidade de Vigo
VALOREN	Programa FEDER de utilização de energias renováveis e utilização racional de energia
VP	Vice Presidência do Governo Regional

## CAPITULO 1

### APROVEITAMENTO ENERGÉTICO NO ARQUIPÉLAGO DA MADEIRA

---

## 1. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO NO ARQUIPÉLAGO DA MADEIRA

### 1.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RECURSOS ENDÓGENOS NO ARQUIPÉLAGO DA MADEIRA

#### 1.1.1 Energia do vento

Analisando a evolução histórica do aproveitamento energético dos recursos endógenos do arquipélago da Madeira, podemos afirmar que estes foram desde sempre utilizados, de acordo com as melhores tecnologias existentes em cada época. Foi a energia do vento que impulsionou as caravelas de Zarco, que aportaram a Porto Santo e à Madeira no século XV. Esse mesmo vento que durante séculos foi importante para a economia regional, quer na produção de energia para a moagem de cereais através dos moinhos, quer na navegação à vela para o transporte de mercadorias e pessoas, bem como na bombagem mecânica de água. Como é sabido o vento esteve na origem da descoberta e do povoamento do arquipélago e de outras regiões insulares. O vento foi aproveitado pelas caravelas, barcos e moinhos.

... *“A Madeira tirou grande proveito da energia propulsora do vento e a Escola de Sagres imprimiu grande progresso à navegação marítima, melhorando a “performance” das velas, ou modificando os tipos de barcos “...(Fonseca, 1980).*

No que concerne ao aproveitamento do vento em terra, temos a utilização dos moinhos na ilha do Porto Santo com mais de três séculos de existência, Figura 1.1. A ilha de Porto Santo foi, portanto, uma das primeiras regiões de Portugal a utilizar o vento como fonte de energia mecânica, através do moinho giratório de madeira de espigão central ou através do moinho fixo de pedra, (Oliveira, 1965).

Viria a ser também a primeira região do país a dispor de um parque eólico para produção de electricidade. O parque eólico entrou em funcionamento em 1984, sendo constituído por oito aerogeradores com uma potência unitária de 30 kW, da marca alemã Aeroman, (Magro, 1988). O parque eólico indicado na Figura 1.2, foi instalado ao abrigo de um acordo de cooperação estabelecido entre Portugal e a República Federal da Alemanha, que visava o

estudo e aproveitamento de energias renováveis na Região Autónoma da Madeira. Ao referido acordo de cooperação técnico-científica designaremos por ERM-I&D<sup>1</sup>.



Figura 1.1 Moinho giratório de madeira, tradicional do Porto Santo



Figura 1.2 Porto Santo, pormenor de montagem do primeiro parque eólico de Portugal

No que concerne à ilha da Madeira, existem referências históricas de moinhos de vento. Numa pesquisa sobre o aproveitamento da energia do vento na ilha da Madeira, encontramos um documento datado de 1883, que refere a existência de um moinho de vento no sítio do Salão, na freguesia da Ponta do Pargo (*Ribeiro, 1996*), e outro documento datado de 1898, que refere também a existência de um moinho de vento no topo da torre do Convento de S. Bernardino, em Câmara de Lobos.

Apesar de alguns contactos com pessoas idosas residentes nos locais referidos, não foi possível confirmar a existência desses moinhos. Nos anos quarenta, o vento começou a ser

<sup>1</sup> Cooperação Técnica Luso-Alemã, Projecto “Investigação e Desenvolvimento de Utilização de Energias Renováveis”, Dec-Lei nº 244, I série, de 22-10-1986.

utilizado pela primeira vez para produção de electricidade. Vários casos pontuais são referidos por historiadores, nomeadamente a instalação de aerodínamos para fornecimento de energia aos sistemas de rádio dos postos de observação de baleias (Figura 1.3). Os telefones alimentados por baterias e aerodínamos viriam a substituir os lençóis na comunicação entre terra e as embarcações no mar, dando a indicação da posição dos cachalotes, (*Doc. CMM-Museu da Baleia-Caniçal*).



Figura 1.3 Posto de observação de baleias-aerodínamo (Foto de José Cymbron)

Entretanto em 1992 e 1993 surgem na ilha da Madeira, no Paúl da Serra e Caniçal, os primeiros parques eólicos privados, dos grupos Perform-1 e Pestana, constituídos por 33 aerogeradores da marca Nordtank, sendo 3 de 130 kW e os restantes de 150 kW.

### **1.1.2 - Energia da biomassa florestal**

A biomassa florestal foi o principal recurso energético aproveitado pelos povoadores da ilha da Madeira. No início da colonização enormes áreas de floresta foram derrubadas com o objectivo de produzir lenha para os engenhos de açúcar ou para a extracção de madeiras. Os principais responsáveis pela destruição da floresta indígena da Madeira terão sido os cerca de 150 engenhos de açúcar existentes no final do século XV.

A floresta vem fornecendo, desde os primórdios do povoamento, matérias primas e energia para as actividades que se instalaram sucessivamente nesta ilha (*Raimundo et al., 1989*).

Refere também Gaspar Frutuoso em “Saudades da Terra”:

.....“ na ilha havia tanta quantidade de madeira tão fermosa e rija, que levavam para muitas partes cópia de táboas, traves, mastros, que tudo se serrava com engenhos ou serras de água, dos quais ainda hoje há muitos da banda do norte da mesma ilha”...



Figura 1.4 Utilização de lenha para cozedura do vime

A importância do aproveitamento energético da fileira florestal para o desenvolvimento da ilha da Madeira, tem vindo a ser referenciada ao longo de séculos, por vários autores, podemos mesmo afirmar que, desde o início do povoamento da ilha, a lenha foi importante para o seu desenvolvimento económico (Figura 1.4).

### 1.1.3 Energia hídrica

O recurso hídrico começou a ser explorado para fins energéticos logo após a descoberta da ilha da Madeira, através da utilização dos moinhos, azenhas e serras de água. Numa carta do Infante D. Henrique dirigida a João Gonçalves (Zarco) ficou o registo da existência de moinhos de água logo na fase inicial do povoamento, (*Doc. MOP-1944*). Neste documento, lê-se: .. “ *E mandai a João Afonso que correja outra mó, se faça um moinho de água segundo o de Tomar*”.... No ano de 1863 havia por toda a ilha da Madeira 365 moinhos de água distribuídos por todas as freguesias. O maior número pertencia ao concelho do Funchal com 79, sendo os restantes distribuídos por Câmara de Lobos, 54, Santana, 52, Ponta do Sol, 49, Calheta, 37, Porto do Moniz, 21, Machico, 18, e S.Vicente 18. O concelho de Santa Cruz tinha 38, (*Ribeiro et al., 1995*). O nome do sítio da Serra de Água no Concelho da Ribeira Brava resultou da existência no local de engenhos de serração de madeiras, movidos a água.

Numa visita efectuada ao Museu Etnográfico da Madeira, vila da Ribeira Brava, podemos constatar que o edifício onde se acha instalado o próprio museu, que outrora fora um velho solar, foi transformado, em 1853, numa fábrica de aguardente que passou a utilizar, em 1862, energia hidráulica, instalando-se para o efeito nesse ano uma roda motriz de madeira, servida por uma levada, e um engenho com três cilindros de ferro horizontais para moer cana sacarina. Funcionava também na fábrica, desde 1868, dois moínhos de água para cereais, Figura 1.5. Mais tarde a azenha em madeira foi substituída por uma azenha metálica. O museu da Ribeira Brava é um testemunho vivo duma central de fins múltiplos do século antepassado, (Guerra, 1996).



Figura 1.5 Turbina em madeira de moinho de água. Museu Etnográfico da Madeira

### **1.1.3.1 - Plano de aproveitamentos hidráulicos da ilha da Madeira**

Não se pode falar em energia hídrica sem que se faça uma breve referência ao Plano de Aproveitamentos Hidráulicos da Ilha da Madeira, iniciado em 1940. Sendo justo salientar o saber e dedicação da equipa chefiada pelo Eng. Manuel Rafael Amaro da Costa, e mais recentemente, as equipas do Eng. Gonçalo Câmara e do Eng. Jorge Pereira que continuaram a obra do “grande mestre” Amaro da Costa.

Nesse plano era considerado um conjunto de obras para aproveitamento dos abundantes recursos hídricos, consistindo, no essencial, em transportar para a vertente sul da ilha os caudais excedentes na encosta norte e turbiná-los com lançamento posterior no regadio.

A execução desse plano pela notável clarividência da sua concepção, para além da sua importantíssima componente hidroagrícola, é responsável ainda hoje, pela quase totalidade da

produção de energia de origem hídrica, (Camacho, 1990). Aquele plano previa, ainda, que a evolução dos custos dos combustíveis líquidos importados poderia justificar, de futuro, a construção de centrais hidroeléctricas que turbinariam as águas disponíveis fora dos períodos de regadio, em média 7 meses por ano. Foi nessa base estudada e construída a central de inverno da Calheta II, com financiamento do Banco Europeu de Investimentos-BEI e comparticipação do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional-FEDER. De referir que a primeira central hidroeléctrica da região foi inaugurada na Serra de Água em 1953. Em 1982, por forma a resolver o preocupante problema do abastecimento de água aos concelhos de Câmara de Lobos e do Funchal, a SRES elaborou um programa base que, no essencial, consistia em tornar acessíveis os mananciais disponíveis acima da cota 600 m, no maciço do Paul da Serra, na zona ocidental da ilha. Esse programa levou à construção do empreendimento denominado “Aproveitamento Hidráulico de Fins Múltiplos da Ribeira dos Socorridos” que foi executado pela EEM.



Figura 1.6 Levadas da ilha da Madeira

Na Figura 1.6 podemos observar dois tipos característicos de levadas<sup>2</sup>, do lado direito uma levada tradicional centenária, e do lado esquerdo uma levada recente, construída em betão armado. Esta levada que abastece a câmara de carga da central hídrica da Calheta I, foi co-financiada pelo Programa Valoren. Este programa do FEDER de apoio à penetração de energias renováveis nas regiões europeias, teve grande sucesso de aplicação na RAM.

<sup>2</sup> Levada – aqueduto de condução de águas de rega - Aproveitamento de Água na Ilha da Madeira, MOP-1944

A título de informação (*Doc.PRAM-2003*), apresentam-se alguns dados acerca dos circuitos hidráulicos do regadio e produção energética:

- Levadas principais: 400 km
- Rede de rega (canais secundários e terceários): 1500 km, sendo 500 km privados
- Área de regadio: 6.000 ha
- Locais de entrega de água (tornadoiros): 100.000
- Volume anual de água consumida no regadio: 55.000 m<sup>3</sup>
- N° de utilizadores (regantes): 40.000

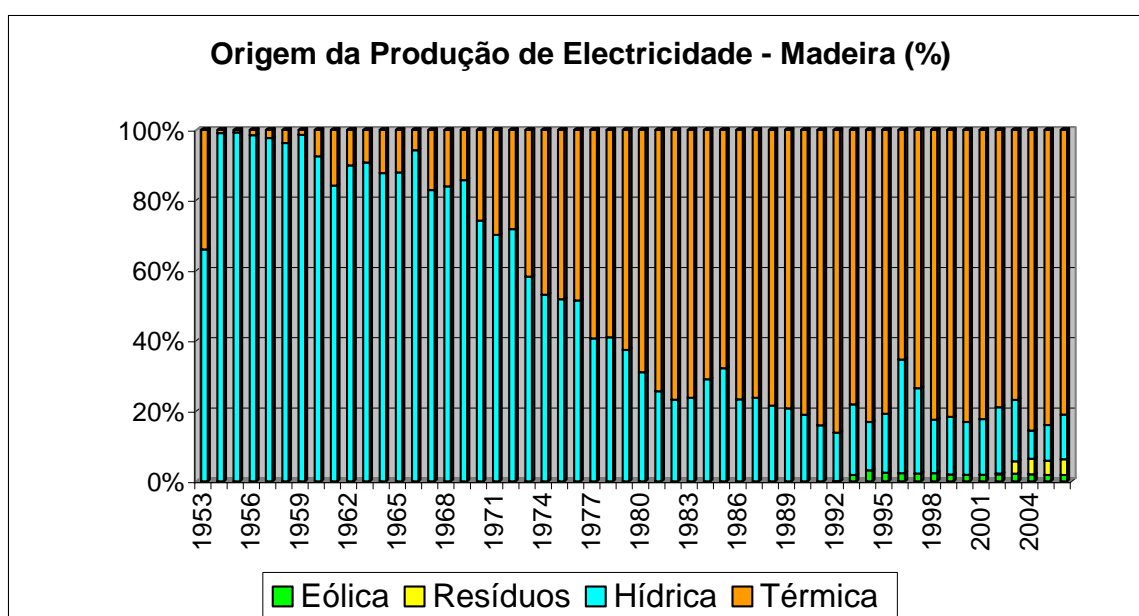


Figura 1.7 Origem da produção de electricidade - ilha da Madeira, 1953-2006 (Fonte: EEM)

No gráfico da Figura 1.7 podemos constatar a elevada importância dos aproveitamentos hidráulicos para fins energéticos nas décadas de 50 a 70, contribuindo nesse período com mais de 60 % do total da produção de electricidade na ilha da Madeira.

#### 1.1.4 Energia do biogás

Como apontamento referir que no domínio do biogás foi construída no Jardim Botânico do Funchal, em 1954, uma instalação de produção de biogás, projecto coordenado pelo Eng. Rui Vieira. O gás obtido a partir dos excrementos de uma vacaria existente no local, era utilizado

para produção de luz e calor. Este sistema foi um dos primeiros do país. Na Figura 1.8 podemos ver o responsável da instalação junto do que ainda resta da mesma.



Figura 1.8 Biodigestores - Jardim Botânico do Funchal, 2000

### 1.1.5 - Energia das ondas do mar

No campo do aproveitamento da energia das ondas foi desenvolvido entre 1979 e 1981 um projecto designado por Pêndulo, projecto inovador para produção de electricidade a partir das ondas do mar, de autoria do Dr. Fernando Almada e do Eng. Martins Soares. Baseado num pêndulo montado num flutuador, com 8 metros de altura e o peso de 11 toneladas, que, excitado pela ondulação do mar, gerava energia transformável em electricidade através de um sistema óleo-hidráulico e um alternador, (*Almada, et al., 1981*). Este projecto foi apoiado pela SRES. Na Figura 1.9 podemos observar o Pêndulo em pleno funcionamento, bem como comparar a sua dimensão com um rebocador que passa nas proximidades.



Figura 1.9 Projecto Pêndulo- produção de energia das ondas

### 1.1.6 Energia solar

Ao longo de décadas têm sido instalados no sector residencial, hotelaria e algumas escolas, sistemas solares térmicos, constituídos por colectores planos, colectores parabólicos concentradores e tubos de vácuo, para aquecimento de águas sanitárias e piscinas, bem como a instalação micro sistemas de produção de electricidade, constituídos por painéis fotovoltaicos e aerogeradores de pequena potência, dado que a região dispõe de condições favoráveis para o aproveitamento da energia solar, que serão confirmadas nesta tese.

#### 1.1.6.1 Energia Solar Passiva

No campo da Energia Solar Passiva, utilização que consiste de forma passiva no aproveitamento da energia solar para aquecimento de edifícios, através de uma concepção cuidada e de aplicação de técnicas de construção e materiais adequados e apropriados ao clima, temos a destacar exemplos de construções antigas, nomeadamente a casa típica de S. Jorge (Figura 1.10) e a casa típica de Porto Santo (Figura 1.11) que são mais confortáveis que as casas construídas, posteriormente, em blocos de betão com cobertura em lage de betão armado, dado que não registam valores de humidade relativa do ar tão elevados.



Figura 1.10 Casa típica de S. Jorge



Figura 1.11 Casa típica do Porto Santo

Mais recentemente, em 1984 e 1985, temos a salientar a construção de dois edifícios, cujo processo de concepção arquitectónica teve em consideração o Sol e a sua energia térmica e lumínica como razão fundamental, para além dos aspectos de natureza estética. Foram marcos importantes de divulgação e demonstração das tecnologias solares passivas.

No capítulo seguinte abordaremos sucintamente os referidos projectos designados por Casa Solar do Porto Santo (Figura 1.12) e Vivenda Schafer (Figura 1.13).



Figura 1.12 Casa Solar do Porto Santo



Figura 1.13 Vivenda Schafer

### 1.1.6.2 Energia solar térmica

Em 1981, o Governo Regional através da Secretaria Regional do Equipamento Social, cria a Divisão de Energias Renováveis-DER com o objectivo de dinamizar acções visando o estudo e a utilização das energias renováveis na região, bem como sensibilizar a comunidade local para a utilização de energia solar para aquecimento de águas sanitárias. Nesse sentido, o DER estudou, projectou e executou várias instalações solares térmicas em escolas, instalações desportivas e instituições da carácter social, bem como organizou vários cursos de dimensionamento de instalações solares térmicas e de térmica de edifícios em colaboração com o Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial-LNETI, e posteriormente com o Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial-INETI.

Na Figura 1.14 podemos observar o Doutor Collares Pereira investigador do INETI e o Eng Teixeira de Sousa, responsável pela DER, numa visita de estudo a uma instalação solar térmica realizada no âmbito de um dos cursos anteriormente referidos.

Entretanto, centenas de colectores solares térmicos foram instalados no arquipélago. Lamentavelmente, a deficiente qualidade de muitos dos colectores, dimensionamentos e montagens inadequadas, bem como o seu elevado custo, desmotivou vários potenciais interessados em sistemas solares, provocando uma crise. Essa crise durou vários anos, tendo sido recentemente ultrapassada. De referir que o novo Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios-RCCTE obriga, sempre que possível, a instalação de

colectores solares, o que irá, certamente, ajudar a dessiminar o solar térmico em edifícios, com benefícios para o ambiente.



Figura 1.14 Instalação solar térmica, Centro de Floricultura, Lugar de Baixo -1983

### 1.1.6.3 Energia solar fotovoltaica

No campo da energia solar fotovoltaica, temos a destacar a instalação na Selvagem Grande, em 1983, da primeira instalação fotovoltaica autónoma de Portugal, (Figura 1.15). Desde essa data temos projectado e instalado no arquipélago várias instalações fotovoltaicas de pequena dimensão, para abastecimento de electricidade em casas, situadas em locais de difícil acesso e distantes das redes de distribuição de energia eléctrica. Como nota histórica, referir que o primeiro farol de sinalização marítima da Marinha Portuguesa a funcionar com energia fotovoltaica, foi o farol da Selvagem Grande, instalado em 1984.



Figura 1.15 Selvagem Grande, primeira instalação fotovoltaica de Portugal -1983

## **1.2 APROVEITAMENTO DE RECURSOS ENERGÉTICOS ENDÓGENOS PARA PRODUÇÃO DE ELECTRICIDADE – SITUAÇÃO ACTUAL**

Actualmente, os recursos locais que assumem relevo no balanço energético regional para a produção de energia eléctrica são a energia hídrica, a energia eólica e a energia dos resíduos sólidos urbanos. A biomassa florestal tem sido utilizada como fonte energética para fins domésticos (confeção de alimentos e produção de águas quentes sanitárias) e também utilizada pela indústria da panificação e restauração. Pese embora o seu eventual interesse para produção de electricidade, esta ainda não foi utilizada, estando em curso um projecto para instalação de uma central de biomassa florestal. Finalmente, a energia solar apresenta um elevado potencial o qual foi confirmado pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade de Vigo e LREC, através da elaboração do Atlas de Radiação Solar do Arquipélago da Madeira, e também pela presente tese. A energia solar fotovoltaica seguramente terá um grande futuro. É de prever a curto e médio prazo a instalação no arquipélago de Parques Solares Fotovoltaicos de vários MWp, bem como a dissiminação de centenas de micro instalações fotovoltaicas autónomas ou para ligação directa à rede pública.

### **1.2.1 Energia das ondas do mar**

Em 2003, o INETI, através do Departamento de Energias Renováveis desenvolveu um Atlas de Ondas Marítimas das costas das ilhas da Madeira e Porto Santo. O recurso energético das ondas na Europa está estimado em 320 GW, representando 16 % do recurso mundial. Em Portugal estão “disponíveis” 21 GW, distribuídos entre o continente e 6 GW para as regiões autónomas (Cruz, et al., 2004). Mesmo sendo extremamente conservadores nas taxas de conversão da energia disponível, este recurso das ondas do mar poderá constituir uma mais valia para a RAM e outras regiões insulares. É um “*filão*” que se encontra ainda por explorar. Contudo, na ilha da Madeira está em curso o Projecto “WAVEGEN”-Wave Pump Submergible e Power Generator, coordenado pela AREAM e EEM, financiado pela U.E. para aproveitamento da energia das ondas na costa norte. Trata-se de um protótipo de 100 kW, sistema do tipo *offshore*, completamente submerso (*Doc. Wavegen-2004*).

### **1.2.2 - Energia da biomassa florestal**

A biomassa florestal, nomeadamente a lenha, representa actualmente uma importante parcela no aproveitamento das fontes energéticas locais. A ilha da Madeira com uma área de 737 km<sup>2</sup>,

tem cerca de 40 % da sua área coberta de floresta. Ainda hoje é utilizada como fonte de energia por uma parte da população do meio rural e também por alguns sectores da panificação, restaurantes, preparação de vimes (Figura 1.11), entre outros. Estima-se um potencial energético de resíduos de biomassa de diferentes origens de 37.310 tep, correspondendo a 140.390 toneladas de resíduos, (PPERAM- 2000) e (INETI, AREAM, ERAMAC, 2005).

A produção de energia eléctrica a partir dos resíduos florestais é um projecto que tem estado em equação há vários anos, estando em curso um estudo visando a instalação de uma central de biomassa florestal de 5 MW. Contudo, as dificuldades de acesso e os custos de transporte do material lenhoso tem levantado alguns entraves à implementação do projecto.

### 1.2.3 - Energia hídrica

Actualmente, o aproveitamento da energia hídrica para produção de electricidade na ilha da Madeira é feito através de 10 centrais hídricas, cuja potência total instalada é de 50,27 MW. Na Tabela 1.1 apresenta-se a potência efectiva de cada central hídrica, bem como as suas características principais. Na Tabela 1.2 e Figura 1.16 apresenta-se a evolução da produção hidroeléctrica, entre 1996 e 2005, e taxa de cobertura, relativamente à produção total de energia na ilha da Madeira.

Tabela 1.1 Centrais hidroeléctricas - 2005

Centrais	Potência Efectiva [MW]	Altura de Queda [m]	Tipo de turbina
<i>Calheta I</i>	1 x 1,1	629	Pelton
	2 x 0,5	430	Pelton
	1 x 2,4	629	Pelton
<i>Serra de Água</i>	2 x 2,45	450	Pelton
<i>Calheta II</i>	1 x 7,3	637	Pelton
<i>R. da Janela</i>	2 x 1,5	398	Pelton
<i>F. da Nogueira</i>	2 x 1,2	343	Pelton
<i>Lombo Brasil</i>	1 x 1,5	316	Pelton
<i>Fajã dos Padres</i>	1 x 1,7	530	Pelton
<i>Santa Quitéria</i>	1 x 1,7	212	Pelton
<i>Rib. Socorridos</i>	3 x 8,0	457	Pelton
<i>Alegria</i>	1 x 0,72	198	Pelton
<b>Total</b>	<b>50,27</b>		

Tabela 1.2 Produção hídrica da ilha da Madeira-1996-2005

Ano	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
<b>GWh</b>	142,2	115,3	78,3	90,1	91	102,6	133,3	130,3	64,4	86,9
<b>%</b>	30,7	23,1	14,6	15,7	14,3	15,1	17,9	16,6	8,5	10

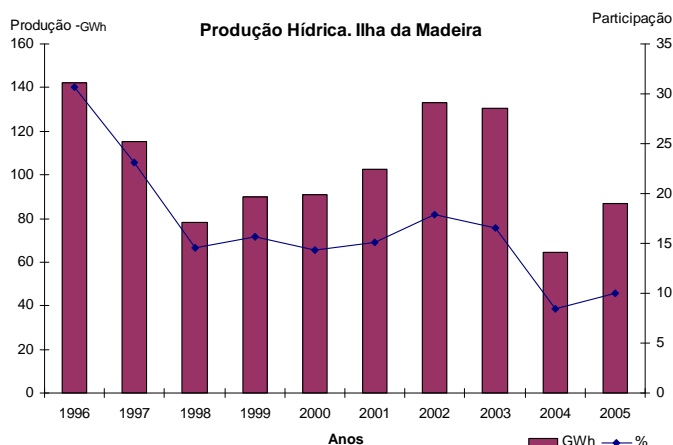


Figura 1.16 Evolução da produção hídrica e taxa de participação

A reduzida capacidade de armazenamento de água para as centrais hídricas e as perdas nos canais de transporte designados por levadas (Figura 1.6), aliada à escassez do recurso no Verão e anos secos, não tem permitido otimizar a potência total instalada nas referidas centrais (Figura 1.17).



Figura 1.17 Central hídrica da Ribeira da Janela, EEM

No entanto, a capacidade do sistema electroprodutor tem vindo a ser aumentada pela EEM e a Investimentos e Gestão da Água - IGA, através da melhoria dos canais de rega, aumento dos

reservatórios de acumulação de água das centrais, nomeadamente: construção do túnel do Covão, construção da Galeria e Câmara da Estação de Bombagem e ampliação da capacidade de acumulação dos túneis da Encumeada e Canal do Norte, (EEM, RA, 2005). Para permitir um melhor aproveitamento dos recursos renováveis endógenos (hídrico e eólico), particularmente durante os períodos de vazio, foi concluído o projecto de transformação da central hídrica da Ribeira dos Socorridos, Figura 1.18, numa central reversível, visando tirar partido da potência instalada na central (24 MW) para efeito de corte de pontas e reserva girante, mesmo em períodos secos, bem como otimizar e flexibilizar a gestão do sistema electroprodutor.



Figura 1.18 Central de fins múltiplos da EEM - Ribeira dos Socorridos

#### 1.2.4 Energia eólica

Como é sabido, a Madeira e outras regiões insulares dispõem de locais com interessantes potencialidades anemo-energéticas (Fonseca, 1968). Actualmente, estão em funcionamento vários parques eólicos (Figuras 1.19 e 1.20), estando indicadas na Tabela 1.3 algumas características dos referidos parques. Na Tabela 1.4 e na Figura 1.21 podemos observar a evolução da produção de energia eólica na região, no período de 1996 a 2005. Estes parques contribuíram em 2005, com cerca de 1,9 % da energia eléctrica total produzida no arquipélago.

A curto prazo prevê-se a instalação de dois novos parques eólicos da EEM no Paúl da Serra, nomeadamente o parque eólico das Pedras com 10 MW e o parque eólico do Loiral com 5 MW.



Figura 1.19 Parque eólico do Caniçal



Figura 1.20 Parque eólico do Porto Santo

Tabela 1.3 Parques eólicos instalados na Madeira e Porto Santo 1985-2003

Empresa	Local	Potencia Total [MW]	Nº de Máquinas	Potência Nominal[kW]	Marca	Modelo	Ligação à rede	Situação Actual
EEM	P.Santo	0,24	8	30	Aeroman	14/30	1985	0
Perform1	P.Serra	0,39	3	130	Nordtank	NTK130	1992	
Pestana	Caniçal	0,9	6	150	Nordtank	NTK150	1993	
Perform2S	P.Serra	1,35	9	150	Nordtank	NTK150	1993	
Perform2N	P.Serra	0,9	6	150	Nordtank	NTK150	1993	
Pestana	B.Cana	1,8	12	150	Nordtank	NTK150	1993	
EEM	P.Santo	0,45	2	225	Vestas	V29-225	1996	
ENEREEM	P.Santo	0,66	1	660	Vestas	V47-660	2001	
ENEREEM	Caniçal	3,3	5	660	Vestas	V47-660	2001	<sup>3</sup>
ENEREEM	P.Serra	3,3	5	660	Vestas	V47-660	2003	

(Fonte:INEGI, 2004)

Tabela 1.4 Evolução da produção eólica na RAM -1996-2005 GWh

Ano	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
<b>Madeira</b>	10	10,2	11,7	10,3	10,8	12,07	14,12	15,94	16,11	15,26
<b>P.Santo</b>	1	1	1	1	1,1	2,33	2,39	2,23	1,8	1,9

### 1.2.5 Energia dos resíduos sólidos urbanos

A Estação de tratamento de resíduos sólidos urbanos da Meia Serra recebe diariamente cerca de 220 toneladas de resíduos urbanos, que são utilizados na produção energética. Em 2005, esta estação contribuiu com cerca de 4 % da electricidade produzida pelo sistema electroprodutor da ilha da Madeira, (Doc. Valor Ambiente, 2007).

<sup>3</sup> Parque transferido para o Paúl da Serra

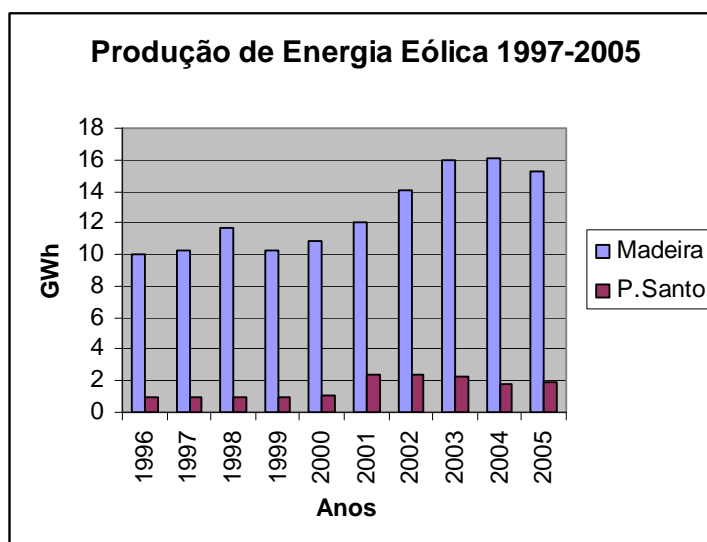


Figura 1.21 Evolução da produção de energia eólica na RAM

Sem dúvida que é um contributo importante em termos energéticos, embora em termos ambientais seja mais interessante a redução e reutilização dos resíduos sólidos urbanos. Nesse sentido, tem sido notório o aumento das quantidades de resíduos reutilizados na região, nomeadamente, cartão, papel, vidro, metal, entre outros. Na Tabela 1.5 apresentam-se os quantitativos de energia eléctrica produzida na estação de incineração em 2004 e 2005. A Figura 1.22, apresenta uma imagem da turbina de 8,8 MW da referida estação.



Figura 1.22 Turbina da instalação de incineração da Meia Serra – Fonte: Valor Ambiente

Tabela 1.5 Energia eléctrica produzida na instalação de incineração da Meia Serra

Ano	2004	2005
Resíduos incinerados diariamente (t)	318,88	308,91
Energia Produzida (kWh)	48.176.269	47.937.629
Energia injectada na rede (kWh)	34.751.382	34.303.753

## **1.2.6 Energia solar**

### **1.2.6.1 Energia solar passiva**

Neste domínio e nas últimas décadas do século passado, entraram em vigor dois regulamentos que visavam a melhoria dos edifícios, quer em termos de envolvente, quer em termos dos respectivos sistemas energéticos de climatização. Os referidos regulamentos são: o RCCTE (Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios) - que visa directamente a melhoria das condições de conforto sem acréscimo do consumo de energia e o RSECE (Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios) - que visa fundamentalmente os edifícios dotados com sistemas energéticos, de forma a melhorar a sua eficiência energética. Recentemente a Directiva nº 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro de 2002, relativa ao desempenho energético dos edifícios, estabelece a obrigatoriedade dos Estados da U.E. implementarem um sistema de certificação energética de todos os novos edifícios e dos existentes que sejam sujeitos a importantes intervenções de reabilitação. Nesse âmbito, foi criado o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar no Interior dos Edifícios com o objectivo, entre outros, do controlo da aplicação do RCCTE e RSECE.

Estes dois regulamentos foram actualizados, na sequência da directiva anteriormente referida, tendo nós participado na revisão dos mesmos, como vogal da Subcomissão de Regulamentação de Eficiência Energética em Edifícios, nomeada pelo Conselho Superior de Obras Públicas. É importante sublinhar que a aplicação do RCCTE vai contribuir para a melhoria da qualidade da construção, nomeadamente a minimização de efeitos patológicos provocados pelas condensações superficiais e redução dos consumos de energia.

Em regiões insulares em que a percentagem de humidade relativa do ar é bastante elevada, apresentando em zonas habitadas valores superiores a 70% (Figura 1.23b) é importante a existência de medidas para melhoria do conforto térmico, através da utilização de práticas e materiais adequados. A aplicação dos “Regulamentos da Térmica”, para além de contribuir para a redução da factura energética da região, vai contribuir seguramente para a melhoria do estado de saúde de milhares de pessoas afectadas por doenças asmáticas e outras. Como é sabido, edifícios sem conforto, muito quentes no Verão e muito frios no Inverno afectam gravemente o estado de saúde dos seus utilizadores.

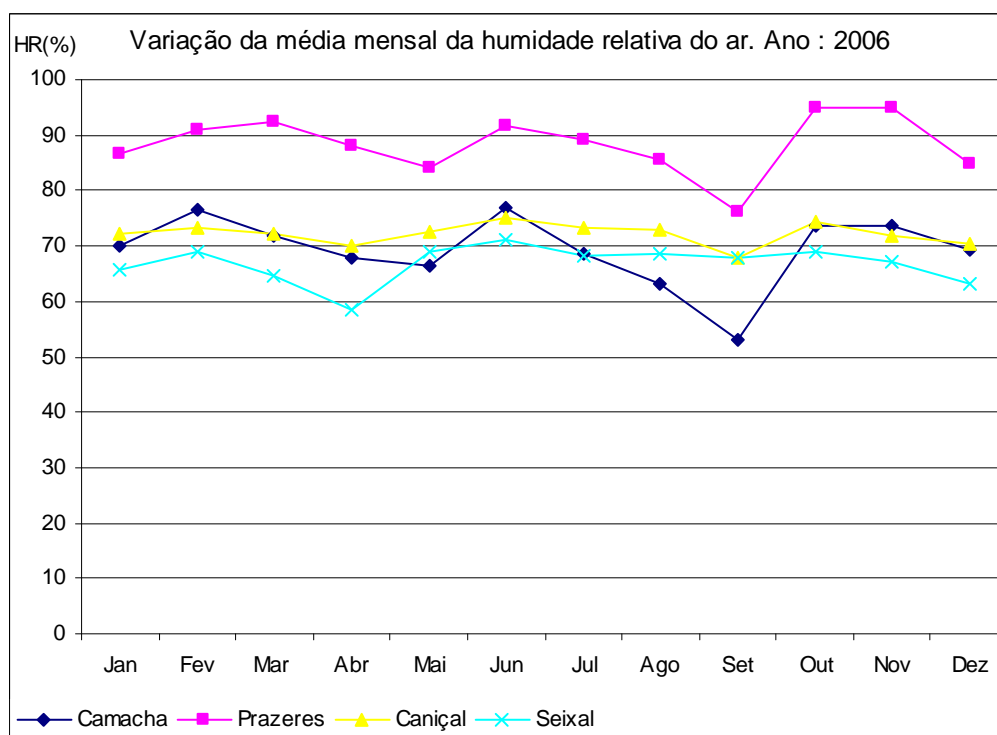
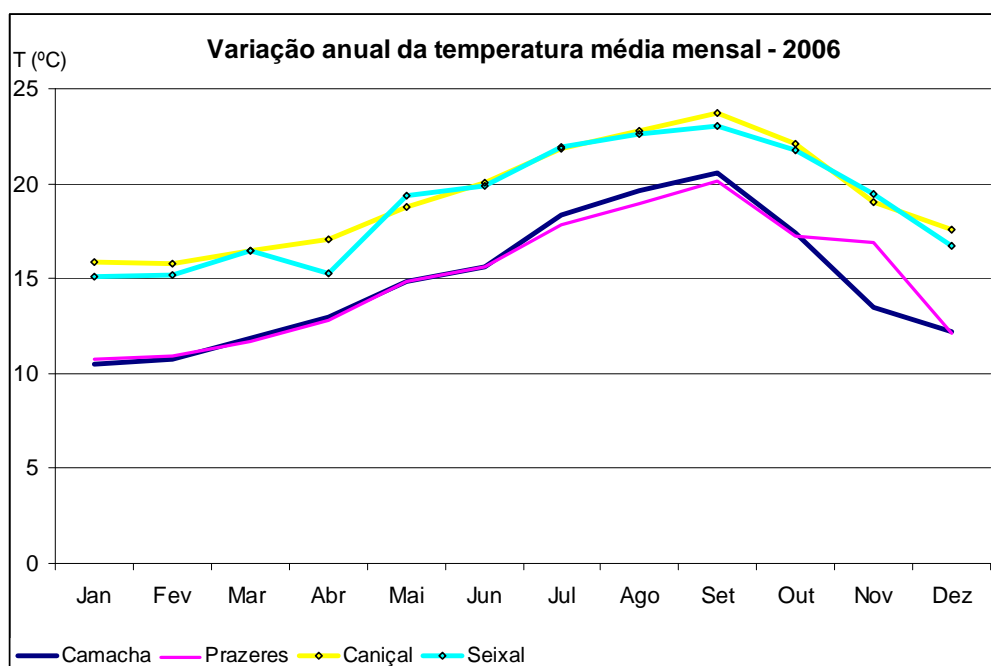


Figura 1.23 a: Comparação anual dos valores mensais da temperatura do ar em quatro locais distintos da ilha da Madeira e b: Comparação anual dos valores mensais da humidade relativa do ar em quatro locais distintos da ilha da Madeira

Nos gráficos das Figuras 1.23a e 1.23b, podemos observar e comparar os valores referentes ao ano 2006, da temperatura e humidade relativa do ar, em quatro locais distintos da ilha da Madeira. Observa-se, pois, que os valores de humidade do ar são muito elevados, pelo que é

imprescindível a aplicação de isolamentos térmicos e outros materiais devidamente dimensionados e adequados.

### 1.2.6.2 Energia solar térmica

Medidas implementadas pelo Governo Regional da Madeira, através da criação do programa SIEST-Sistema de incentivos à energia solar térmica para o sector residencial, têm contribuído para o aumento da procura de colectores solares térmicos no sector doméstico (Figura 1.24), e conseqüente redução da dependência energética do exterior, através do aproveitamento das energias renováveis de reduzido impacto ambiental. Ao abrigo do SIEST foram instalados 2681,31m<sup>2</sup> de colectores solares térmicos em 787 instalações. Estima-se em cerca de 3200 m<sup>2</sup> o número total de colectores instalados na região nos últimos cinco anos, de acordo com uma sondagem que realizámos junto de fornecedores e instaladores.

No gráfico da Figura 1.25, podemos observar a evolução do interesse pela utilização de colectores solares para o aquecimento de águas sanitárias.

É, pois, com agrado que se verifica actualmente o aparecimento de novas firmas com novas tecnologias e equipamentos certificados.

A qualidade dos equipamentos e a formação dos projectistas e instaladores é a “chave” para expansão do solar térmico com êxito. O LREC, em nosso entender, devia coordenar e realizar acções de formação para instaladores e projectistas em parceria com entidades privadas, dado que dispõe de *know how* para o efeito. Na Figura 1.26 podemos observar o banco de ensaio de colectores solares térmicos do Laboratório, disponível para formação.



Figura 1.24 Instalação solar térmica participada pelo SIEST

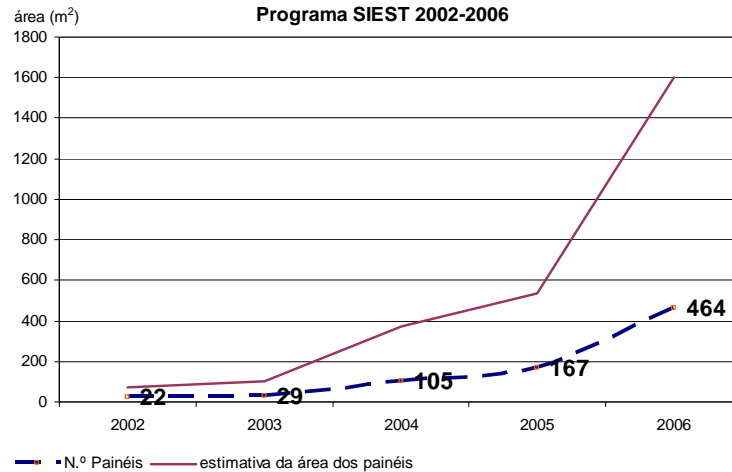


Figura 1.25 Evolução das instalações compartilhadas pelo SIEST, 2000-2005 (Fonte: DRCIE)



Figura 1.26 Banco de ensaios de colectores solares térmicos do LREC

Acresce que o programa MAPE - medida de apoio ao aproveitamento do potencial energético e racionalização de consumos, criado e regulamentado pela Portaria nº 198/2001, de 13 de Março, alterada posteriormente pela Portaria conjunta 1219-A/200, de 23 de Outubro, apoia a utilização de tecnologias energéticas, nomeadamente, a instalação de sistemas para aquecimento de água utilizando colectores solares térmicos, instalações para abastecimento próprio de água quente e instalações destinadas a fornecer energia a terceiros sob a forma de água quente, com um impacte ambiental positivo, mas não tem tido sucesso na região, provavelmente por falta de divulgação junto de potenciais interessados.

### **1.2.6.3 - Energia solar fotovoltaica**

Existem actualmente espalhadas pelo arquipélago cerca de três dezenas de pequenas instalações fotovoltaicas e híbridas (Figura 2.40). São todas do tipo *stand alone*, contudo, estão em estudo alguns projectos para instalação de sistemas integrados na rede pública, nomeadamente pequenas instalações de 5 kWp até 50 kWp e parques solares fotovoltaicos de 2 MWp.

Acresce que no domínio do fotovoltaico temos vindo a coordenar desde 2001, o Projecto PAUER (Figura 1.27), que tem por objectivo a avaliação e utilização de energias renováveis na região. Este projecto, participado pelo Plano de Ordenamento de Plurifundos da Região Autónoma da Madeira (POPRAM III-FEDER), tem permitido a instalação de pequenos sistemas fotovoltaicos e híbridos, em locais isolados, a montagem de redes de estações climáticas automáticas e manuais, bem como a elaboração de estudos e projectos dos quais salientamos:

- PAC-Projecto Assistido por Computador para Simulação do Comportamento de Sistemas Solares Térmicos e Fotovoltaicos (INETI/LREC)
- Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira (LESUV/LREC)
- Estudo do Clima Urbano da Cidade do Funchal.

O valor total do investimento foi de 808.000,00 Euros, tendo o POPRAM co-financiado o projecto PAUER em cerca de 70 %. No Capítulo 2 são descritas as características técnicas de todas as instalações fotovoltaicas instaladas pela SRES e LREC de 1984 a 2007.

## **1.3 CARACTERIZAÇÃO DO SECTOR ELECTROPRODUTOR DO ARQUIPÉLAGO DA MADEIRA**

### **1.3.1 Potência eléctrica instalada e produção**

O sector electroprodutor do arquipélago é constituído por duas infraestruturas independentes, localizadas nas duas ilhas principais: Madeira com cerca de 237.000 habitantes e Porto Santo

com cerca de 5.000 habitantes (Figura 1.28). Na ilha da Madeira a electricidade é produzida em duas centrais termoeléctricas com uma potência instalada de 166,5 MW, em dez centrais hídricas com uma potência instalada de 51,09 MW, em cinco parques eólicos com uma potência instalada de 8,64 MW, e ainda numa central incineradora de RSU (resíduos sólidos urbanos) dotada com uma turbina de 8,8 MW.



Figura 1.27 Projecto PAUER, indicação do valor do investimento

Na ilha de Porto Santo a electricidade é produzida numa central termoeléctrica com uma potência instalada de 7 MW e em dois parques eólicos com uma potência instalada de 1,11 MW. No total, no arquipélago, estão instalados 173,5 MW de potência termoeléctrica, 51,09 MW de potência hídrica, 9,75 de potência eólica, e 8,8 MW de potência térmica proveniente dos resíduos sólidos urbanos.

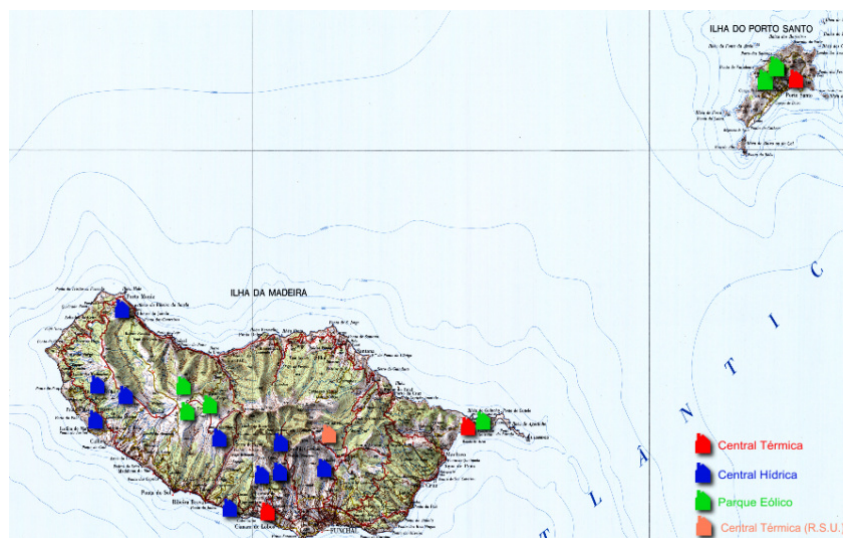


Figura 1.28 Localização das centrais eléctricas do arquipélago da Madeira

Como referimos anteriormente estão em funcionamento trinta micro sistemas fotovoltaicos e híbridos espalhados pelo arquipélago para produção de electricidade nas ilhas Desertas, Selvagens e ainda em casas isoladas nas ilhas da Madeira e Porto Santo. A produção de energia eléctrica no arquipélago cresceu no período de 2001 a 2005, 29,30 %, correspondendo em termos quantitativos, a um aumento de produção de 697,85 GWh em 2001 para 902,37 GWh em 2005, e a um crescimento anual da ordem do 6%. A Figura 1.29 apresenta um gráfico interessante sobre a origem da produção de energia eléctrica, no período 1953-2006, segundo a origem: térmica, hídrica, eólica e de resíduos sólidos urbanos (EEM, RA, 2006).

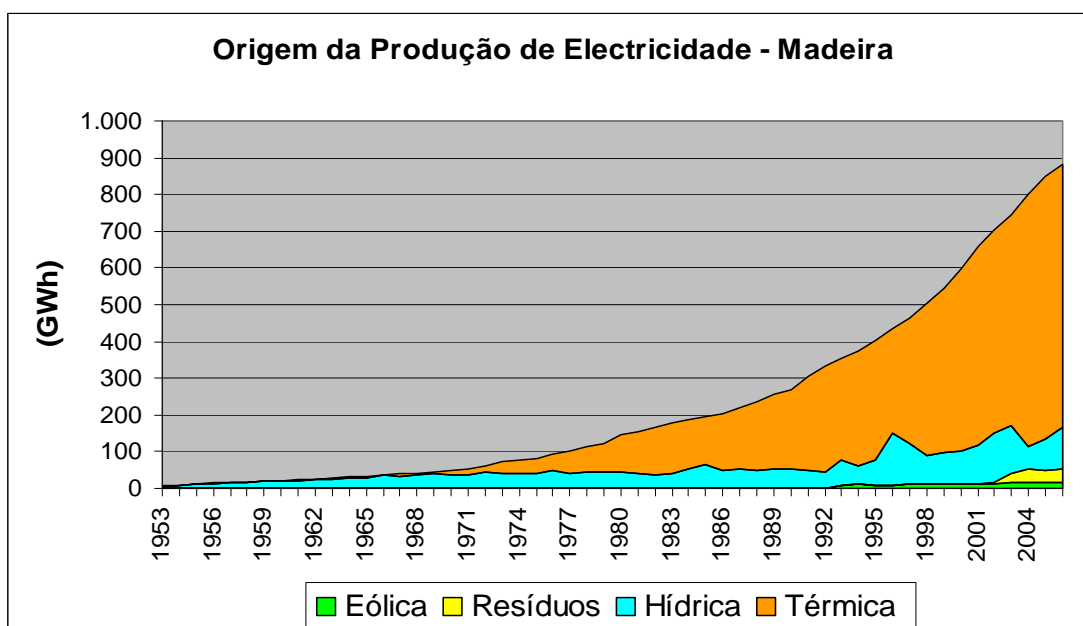


Figura 1.29 Origem da produção de electricidade na RAM, 1953-2006 (Fonte:EEM)

As Figuras 1.30, 1.31 e 1.32 apresentam a produção de electricidade no conjunto da Região Autónoma da Madeira, e das ilhas da Madeira e Porto Santo, no ano 2005, em percentagem, e segundo a fonte energética, respectivamente.

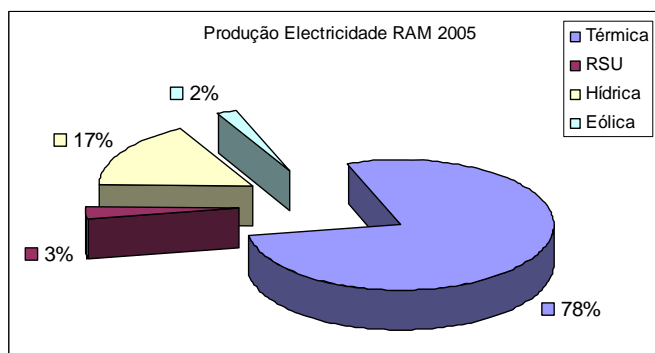


Figura 1.30 Produção de electricidade na RAM, 2005 (Fonte: EEM)

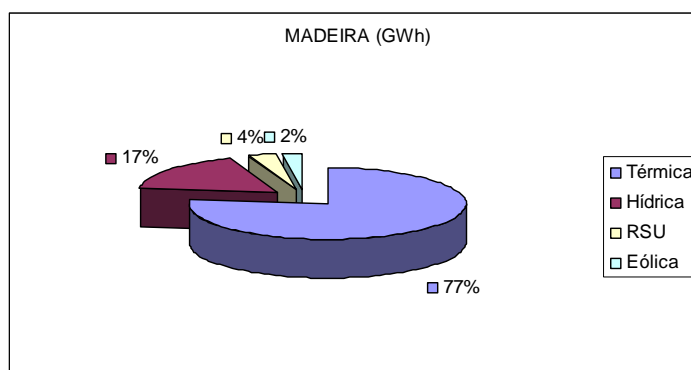


Figura 1.31 Produção de electricidade na ilha da Madeira, 2005 (Fonte: EEM)

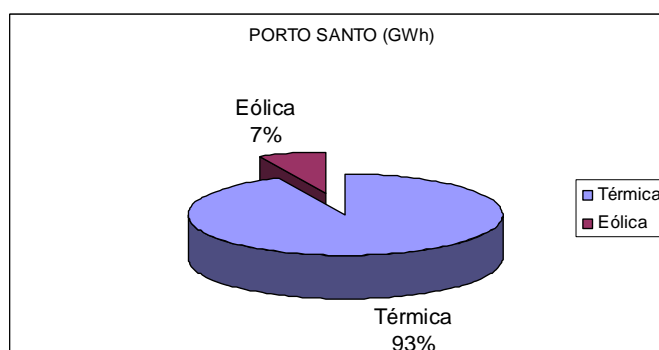


Figura 1.32 Produção de electricidade na ilha do Porto Santo, 2005 (Fonte: EEM)

Em 2005, a produção de energia eléctrica na ilha da Madeira foi de 863,89 GWh, tendo sido atingida no mês de Dezembro a ponta máxima de potência de 153,4 MW. No mesmo ano, a produção no Porto Santo foi de 38,48GWh, com a ponta máxima de potência de 8,0 MW, registada no mês de Agosto. Da produção total da energia eléctrica no arquipélago em 2005, 763,96 GWh tiveram origem térmica (fuel e gásóleo), 86,94 origem hidroeléctrica, 34,30 origem nos resíduos sólidos urbanos e os restantes 17,16 GWh provieram dos parques eólicos, (EEM, RA,2006).

### 1.3.2 Rede de transporte e distribuição de energia eléctrica

A rede pública de transporte e distribuição de energia eléctrica em média e alta tensão da EEM é caracterizada pelos indicadores físicos indicados nas Tabelas 1.6, 1.7 e 1.8, referentes a redes de linhas de transporte (aérea e subterrânea), subestações, e postos de transformação. Na Figura 1.33 apresenta-se a rede de transporte e a localização das centrais do sistema electroprodutor da Região Autónoma da Madeira.

Tabela 1.6 Rede de linhas de transporte e distribuição da EEM-2005 [km] (Fonte: EEM)

Tipo de linha	Aérea	Subterrânea	Total
<b>6 kV</b>	527,86	547,72	1.075,56
<b>30kV</b>	234,85	110,26	345,11
<b>60kV</b>	68,10	-	6,10

Tabela 1.7 Rede de subestações da EEM-2005 (Fonte: EEM)

	Madeira	Porto Santo	RAM
<b>Nº Subestações</b>	25	3	28
<b>Potência instalada MVA</b>	427	16	443

Tabela 1.8 Rede de postos de transformação da RAM-2005 (Fonte: EEM)

Concelho	Privados	Públicos	Nº total	P (VA)
<b>Funchal</b>	102	433	535	285.380
<b>Câmara Lobos</b>	11	98	109	41.750
<b>Ribeira Brava</b>	2	94	96	29.420
<b>Ponta do Sol</b>	2	47	49	16.705
<b>Calheta</b>	3	111	114	27.508
<b>Porto Moniz</b>	-	45	45	10.560
<b>S.Vicente</b>	2	51	53	14.065
<b>Santana</b>	9	74	83	17.955
<b>Machico</b>	25	112	137	53.905
<b>Santa Cruz</b>	39	224	263	103.665
<b>Porto Santo</b>	17	63	80	28.735
<b>Total</b>	<b>212</b>	<b>1.352</b>	<b>1.564</b>	<b>629.638</b>

Nesta área, tem sido dada uma resposta adequada ao crescimento dos consumos, graças a significativos investimentos em novas instalações e remodelações em subestações, linhas de interligação e ao telecomando/telecomunicações, visando garantir uma resposta adequada ao crescimento dos consumos, (EEM, RA, 2005, 2006).

Um aspecto importante a salientar é que a cobertura de energia eléctrica no arquipélago é muito próxima dos 100%, não existindo núcleos populacionais sem energia eléctrica.

### 1.3.3 Procura de electricidade

No ano 2005, a procura de energia eléctrica no arquipélago foi de 802,90 GWh. Na Tabela 1.9 podemos analisar a evolução da distribuição da procura de energia eléctrica pelos vários sectores de consumidores e Concelhos da RAM, em 2005.

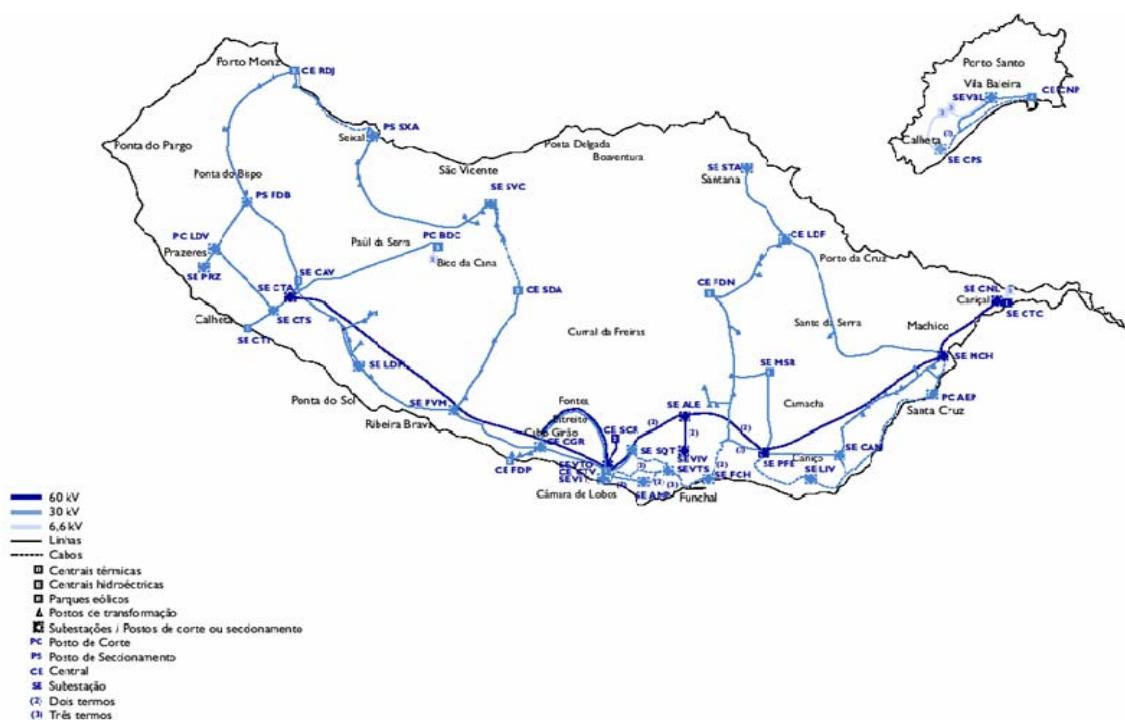


Figura 1.33 Rede de transporte de energia da RAM em média e alta tensão (Fonte: EEM)

Tabela 1.9 Evolução da procura de electricidade por áreas de consumo-2005 [GWh] (Fonte: EEM)

	Uso doméstico	Hotelaria	Comércio e Serviços	Indústria	Agricultura	Iluminação Pública	Serviços Públicos.	Construção Civil	Total	%
<b>I.Madeira</b>	242,67	134,49	164,04	77,63	5,63	68,52	59,06	16,32	768,36	100
	31,6 %	17,5%	21,3%	10,1%	0,7%	8,9%	7,7%	2,1%	100,0%	
<b>Funchal</b>	109,26	97,12	113,81	21,37	0,70	16,09	34,74	7,38	400,47	52,1
<b>C.Lobos</b>	28,09	3,84	6,49	10,94	0,34	8,81	2,28	1,56	62,36	8,1
<b>Rib.Brava</b>	11,29	2,48	6,45	1,17	0,05	6,17	1,82	1,73	31,15	4,1
<b>Ponta Sol</b>	8,11	2,29	1,76	2,41	0,50	3,64	1,41	0,22	20,33	2,6
<b>Calheta</b>	11,49	3,38	3,64	1,19	0,66	5,72	1,03	0,45	27,57	3,6
<b>P.Moniz</b>	2,66	1,41	1,14	0,18	0,38	2,67	0,89	0,26	9,58	1,2
<b>S.Vicente</b>	5,41	2,25	1,73	0,86	0,04	4,24	0,87	0,22	15,61	2,0
<b>Santana</b>	7,67	1,95	3,20	0,98	0,34	3,73	1,25	0,19	19,31	2,5
<b>Machico</b>	21,73	4,58	6,81	13,65	0,78	7,53	2,47	1,98	59,52	7,7
<b>S.Cruz</b>	36,96	15,19	19,01	24,89	1,83	9,93	12,31	2,34	122,46	15,9
<b>P.Santo</b>	6,62	5,63	5,06	11,23	0,11	1,97	3,37	0,55	34,54	
	19,9 %	17,5%	12,1%	32,5%	0,3%	5,3%	10,7%	1,8%	100%	
<b>Total RAM</b>	249,29	140,13	169,10	88,86	5,74	70,50	62,43	16,87	802,90	
	31,0 %	17,5%	21,1%	11,1%	0,7%	8,8%	7,8%	2,1%	100 %	

### 1.3.4 Perspectivas de evolução do sistema electroprodutor

De acordo com os Planos de Política Energética da Região Autónoma da Madeira, elaborados em 1989, 2000 e 2002, em termos energéticos, qualquer que seja o cenário, a região dependerá dos derivados de petróleo, pelo que a base da produção de electricidade será sempre de origem térmica, (*PERAM, 1989*) e (*PPERAM, 2000*).

O Plano de Política Energética define como objectivos a segurança do aprovisionamento, a competitividade económica e a protecção do ambiente. Para além destes objectivos, a estratégia definida tem também como um dos eixos principais o aumento da penetração de energias limpas e renováveis na região, através de alternativas exequíveis e financeiras viáveis às fontes petrolíferas de energia.

É no âmbito destes vectores de desenvolvimento que a EEM acaba de concluir a Central de Bombagem da Ribeira dos Socorridos, integrada num sistema reversível que vai possibilitar a melhor gestão dos recursos hidroeléctricos (podendo a central hidroeléctrica dos Socorridos funcionar em qualquer altura do ano), mas também criar condições para aumentar a capacidade de utilização de outras fontes renováveis, em especial de origem eólica. Por outro lado, vem também a EEM desde 2002, a desenvolver esforços no sentido de viabilizar a introdução do gás natural na ilha da Madeira.

O projecto do Gás Natural assume um carácter estratégico e estruturante da economia regional, (*Doc.VP-EEM, 2004*). O gás natural é a forma de energia mais competitiva actualmente em Portugal, contribuindo também com significativas vantagens do ponto de vista ambiental.

Os estudos já realizados pelo Instituto Superior Técnico (*IST-Rp.01, 2004*), demonstram a viabilidade técnica económica do projecto, tornando o gás natural competitivo, face à utilização de fuelóleo para a produção de energia eléctrica na central térmica da Vitória (Figura 1.34), proporcionando enormes vantagens ambientais, através de uma redução significativa das emissões de poluentes para a atmosfera.



Figura 1.34 Central térmica da Vitória, EEM

A substituição do fuelóleo pelo gás natural na produção de electricidade apresenta vantagens muito significativas para a qualidade ambiental: menos 52 % de CO<sub>2</sub>, menos 85% de NO<sub>x</sub>, ausência da emissão de SO<sub>2</sub>, e de partículas, (Figueira, 2007).

Tomando como base uma produção de energia eléctrica de 200 GWh, cerca de metade da produção da Central da Vitória, no Funchal, em 2003, essa redução de emissões, seria de 78000 toneladas de CO<sub>2</sub>, 21.000 toneladas de SO<sub>2</sub>, 340 toneladas NO<sub>x</sub> e 20 toneladas de partículas. A redução da emissão de 78000 toneladas de CO<sub>2</sub>, por ano, equivale a retirar de circulação cerca de 39.000 automóveis (200 g/km e 10000 km/ano).

Estudos elaborados pelo IST (*IST-R.P. 01, 2004*) referem, ainda, que a introdução do gás natural, viabilizada pela produção de electricidade, poderá, numa fase subsequente, constituir também, uma solução vantajosa para outros sectores da economia regional, designadamente na hotelaria, indústria, sector doméstico e transportes, como alternativa aos produtos derivados do petróleo.

O projecto do gás natural permitirá o normal crescimento do sistema electroprodutor da Madeira, num horizonte de 20 a 25 anos, e enquadra-se no programa do Governo Regional, ao prever, em fases posteriores, a construção de infra-estruturas portuárias de apoio à pesca e para descargas de mercadorias a granel. Importa referir que, a EEM, está a instalar uma turbina de 14 MW (dual-fuel), destinada à cobertura de ponta, cujas características técnicas possibilitarão posteriormente a sua integração plena no projecto do gás natural, (*Doc. EEM-2005*).

CAPITULO 2  
CONTRIBUTO PARA O DESENVOLVIMENTO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO  
ARQUIPÉLAGO DA MADEIRA

---

## **2. CONTRIBUTO PARA O DESENVOLVIMENTO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO ARQUIPÉLAGO DA MADEIRA**

### **2.1 GENERALIDADES**

Iniciámos a nossa actividade no domínio da energia em 1982, na Divisão de Energias Renováveis da Direcção de Serviços de Hidráulica da Secretaria Regional do Equipamento Social (DER-SRES) e, a partir de 1991, com a criação do Laboratório Regional de Engenharia Civil<sup>4</sup> (LREC), fomos integrados no Departamento de Recursos Naturais e Hidráulica-DRNH do referido Laboratório, tendo sido nomeado chefe de Departamento. Posteriormente em 2004 é aprovada a nova lei orgânica do LREC<sup>5</sup> e o DRNH passa a designar-se por Departamento de Hidráulica e Tecnologias Energéticas-DHTE. Na sequência de concurso público realizado para o efeito fui nomeado em 1995 director de serviços do DHTE.

Este Departamento tem por objectivo elaborar estudos e projectos de I&D, desenvolver formação tecnológica, colaborar na preparação de normas e regulamentos técnicos, bem como prestar apoio nos domínios da Hidráulica e Tecnologias Energéticas. O interesse pela actividade desenvolvida no campo das energias renováveis teve como motor ou embrião a realização no Funchal, em 1982, da I Semana da Energia Solar, visando a divulgação das vantagens da utilização da energia solar e de processos tecnológicos de concepção, fabrico e montagem de colectores solares. Foi um sucesso esta acção, tendo seguramente contribuído para a motivação de várias entidades públicas e privadas, para a importância do aproveitamento das energias renováveis na região. Este certame contou com uma exposição de colectores solares, apresentada por várias firmas da região (Figura 2.1).

Em 1984 realizámos no Funchal a II Semana de Energia Solar, encontro internacional sobre arquitectura solar, dessalinização solar e novas tecnologias que contou com a participação da Universidade Técnica de Berlim, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, da Royal Scientific Society Jordan e do Centro de Investigação Nuclear de Atenas.

---

<sup>4</sup> Decreto Legislativo Regional, nº 9/91/M, de 2 Abril

<sup>5</sup> Decreto Regulamentar Regional nº 12/2004/M, de 26 de Abril



Figura 2.1 I Semana da Energia Solar da Madeira-1982

Como actividade desenvolvida na Divisão de Energias Renováveis, registamos a elaboração de estudos, projectos, bem como a montagem de instalações solares térmicas, para aquecimento de águas sanitárias e de piscinas em escolas e outras instituições públicas. Em 1984, na sequência do acordo de cooperação técnico-científica luso-alemão ERM-I&D anteriormente referido, para desenvolvimento de I&D em energias renováveis no arquipélago da Madeira, bem como dotar o LREC de *know how* nos domínios da energia eólica e energia solar, a região viria a ser beneficiada com projectos comparticipados pelo parceiro alemão. Assim, participámos directamente nos seguintes projectos: Estação Piloto de Dessalinização Solar, Casa Solar do Porto Santo, Implementação do Parque Eólico do Porto Santo (primeiro do país) e desenvolvimento de um Programa de Anemometria na Ilha Madeira para fins energéticos. Ainda no âmbito do programa ERM-I&D, foi-me atribuída uma bolsa de estudo com a duração de 13 meses, em energias renováveis, tendo frequentado na R.F.A. os seguintes cursos e estágios: na Universidade Técnica de Berlim, curso de tecnologias solares passivas e solares térmicas, na Universidade de Erlangen, curso de dessalinização por osmose inversa, no Centro de Investigação Tecnológica GKSS-Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt mbH e na Empresa Dornier System GmbH em Friedrichshafen, estágios em sistemas eólicos, fotovoltaicos, bombas solares térmicas e dessalinização solar. Esta formação avançada foi essencial para, posteriormente, dinamizar a área das energias renováveis na RAM, desenvolvendo, estudando e participando em projectos nacionais e internacionais, que representam claras mais valias para a região, dos quais se destacam:

## 2.2 PARTICIPAÇÃO EM ESTUDOS E PROJECTOS DE I&D

### 2.2.1 Programas de anemometria para fins energéticos

#### 2.2.1.1 Programa de anemometria da ilha do Porto Santo (PAIPS)

Em 1981, é aprovado pelo Governo Regional da Madeira -GR o programa de prospecção e avaliação da energia eólica na ilha do Porto Santo, elaborado e coordenado pelo Eng. Henrique Teixeira de Sousa, chefe da DER-SRES. As condições da ilha pareciam muito apropriadas para a utilização desta forma de energia, nomeadamente a velocidade média anual do vento elevada, o relevo pouco acentuado, a rede eléctrica de pequena dimensão, o custo de produção de electricidade da central térmica elevado bem como o custo de produção de água potável na central dessalinizadora. Em Janeiro de 1982 iniciamos o PAIPS com o apoio científico do saudoso Eng. Humberto da Fonseca do Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica-INMG. Para a realização desta prospecção, instalámos 5 anemómetros em locais pré-seleccionados, com base em indicadores tradicionais, informação recolhida e visitas de campo. A única estação anemométrica que existia na ilha era a do aeroporto, que serviu de referência, pois tinha 10 anos de funcionamento. E, assim, foi possível avaliar a velocidade média do vento e calcular a energia disponível anualmente para cada um dos locais estudados. Na Tabela 2.1 indicam-se os valores médios anuais da velocidade do vento, registados nas 5 estações do Porto Santo.

Tabela 2.1 Velocidades médias anuais do vento da ilha do Porto Santo Fonte:SRES-DER

Referência	Sítio	Velocidade média (m/s)	Turbulência	Altitude (m)
PS1	Cabeço das Flores	6,75	0,26	170,9
PS2	Terra Branca	5,00	0,207	104,5
PS3	Cabeço do Carvalho	6,24	0,089	115,9
PS4	Camacha	5,47	0,286	156,4
PS5	Portela	5,99	0,193	174,4
524	Aeroporto	5,01	-	78,3

Em colaboração com ERA-Technology, gabinete inglês de engenharia energética, elaboramos estudos do regime de rajada nos locais em prospecção, da variação da velocidade do vento em altitude, do sistema electroprodutor da ilha, dos aerogeradores disponíveis no mercado, sua

fiabilidade e consequências da sua ligação à rede eléctrica. Finalmente, foi seleccionado o Cabeço do Carvalho como local mais indicado para a instalação de um parque eólico (Ballard, 1983). Entretanto, em 1984, na sequência do acordo ERM-I&D, a região recebeu 8 aerogeradores da marca Aeroman, de 30kW de potência unitária, para instalação no Porto Santo. Contudo, o parceiro alemão através do Kreditanstalt fur Wiederaufbau-KfW, exigiu que se fizesse uma nova avaliação do potencial eólico do local, pelo que colaboramos também nesse programa. Esta avaliação reconfirmou o local como adequado para a instalação do parque eólico, que viria a ser instalado em 1984, constituindo o primeiro do país.

### 2.2.1.2 Programa de anemometria da ilha da Madeira (PAIM)

Com o apoio técnico do gabinete alemão de engenharia, Ibek-Bremen, desenvolvemos o PAIM, que decorreu de 1986 a 1989. Para o efeito, foram instalados na ilha da Madeira 10 estações de medição do vento em locais previamente seleccionados, com base em indicadores tradicionais e um levantamento aéreo feito através da utilização de uma aeronave ligeira, para uma observação dos locais e obtenção de fotografias aéreas dos mesmos, (Spenk, 1989). A Figura 2.2 reporta-se à montagem da estação MD-01 no Caniçal e a Figura 2.3 refere-se à Estação MD-06 do Paul da Serra (centro) dotada com dois anemómetros colocados a 5 e 10 metros de altura para estudar a variação do vento com a altitude.



Figura 2.2 Pormenor de montagem, MD-01



Figura 2.3 Estação MD-06 Paúl Sul

Todas as estações foram equipadas com sensores de velocidade de vento, e três delas dispunham também de sensores de direcção. Para a recolha dos dados, utilizou-se um PC com

software adequado para o efeito. O hardware e software foram fornecidos pela Decon-empresa alemã de software. As estações de medição eram constituídas por mastros tubulares basculantes com 10 metros de altura, devidamente escorados, construídos no LREC, estando os copos do anemómetro colocados no topo do mastro. Na Tabela 2.2 apresenta-se a localização e o tipo de instrumentos de medida de cada uma das estações utilizados no período 1988-1998.

Tabela 2.2 Localização das estações anemométricas - ilha da Madeira

Código	Local	Tipo de sensor
MD-01	Prainha- Caniçal	V +D
MD-02	Santo da Serra/Lagoa	V
MD-03	Areeiro	V
MD-04	Redondo/Santana	V+D
MD-05	S. Jorge/Barrocal	V
MD-06	Paúl da Serra/Sul	V
MD-07	Paúl da Serra/Centro	V
MD-08	Paúl da Serra/Estanquinhos	V+D
MD-09	Porto Moniz/Vila	V
MD-10	Santo/Porto Moniz	V

V -Velocidade de vento  
D - Direcção do vento

A meia altura do mastro de 10 metros, ficou colocada a unidade de armazenamento de dados (logger), do modelo Wicom II, da GBI de Berlim, instalada em caixa estanque devidamente protegida contra chuva e humidade. O software permitiu a medição da velocidade do vento em valores médios por minuto, o registo do rumo do vento em cada minuto, a análise prévia estatística dos valores observados e o armazenamento dos valores durante um período de vários meses até à sua transferência para uma memória de dados externa. Posteriormente procedeu-se à análise estatística da distribuição da frequência da velocidade do vento, da classificação dos períodos de vento fraco e períodos de calma, da distribuição da frequência do rumo do vento, da variação diurna média mensal e do registo de valores médios e máximos, (Decon, 1990). Na Tabela 2.3 apresentam-se os dados do primeiro programa de anemometria realizado na ilha da Madeira, 1988-1989.

Da análise dos mesmos, tiraram-se as seguintes conclusões: o planalto do Paúl da Serra e o Caniçal apresentam condições favoráveis para o aproveitamento eólico; no Paúl da Serra a

velocidade média anual estava compreendida entre 6 e 6,9 m/s, e no Caniçal a velocidade média anual era de 8 m/s (Spencck, 1990).

No Santo da Serra, junto à lagoa, a velocidade média anual era de cerca de 5 m/s, Santana tinha a velocidade média anual compreendida entre 4 a 5 m/s e nos locais expostos de Porto Moniz, o valor desta era de 4 a 5 m/s, sendo considerados locais com condições moderadas para o aproveitamento eólico. Os outros locais, como Areeiro, S. Jorge e Santa do Porto Moniz foram considerados locais não indicados para o aproveitamento da energia eólica, por apresentarem valores muito baixos. O maciço montanhoso do Areeiro apresentava uma velocidade média anual de 3,1 m/s, tendo este valor sido uma surpresa, pois tudo apontava para que o vento no Areeiro fosse de maior intensidade e regularidade. Na região de S. Jorge registaram-se valores de velocidade média anual de 2,9 a 3,9 m/s e, finalmente, na Santa do Porto Moniz registaram-se velocidades médias anuais de 3,9 a 4,8 m/s.

Tabela 2.3 Programa PAIM-velocidade média mensal de vento, ilha da Madeira, 1988-1999 [un: m/s]

Estações/Mês	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Média
MD-01 – Caniçal	7,6	8,3	11,3	9,4	7,7	7,2	6	7,6	6,6	8,3	7,7	8,7	8
MD-02 - S. Serra	4,4	5,1	6,3	6,2	5,1	4,4	3,8	3,7	4,3	5,5	4,6	6	5
MD-03 – Areeiro	2,7	2,2	2,9	3	3,1	4,4	3	3,7	3	3,8	2,9	2,5	3,1
MD-04 – Santana	3	3	3,2	3,4	3	4,1	3,6	5	4,4	5,9	4,6	3,6	3,9
MD-05 - S. Jorge	2	2,2	2,5	2,4	2,4	2,6	2,7	4,8	3,6	4,4	3,1	3	2,9
MD-06 Paul-Sul	5,7	6,9	6,1	6,7	5,8	7,4	6,4	6,3	6,6	6	6,4	9,5	6,6
MD-07 PAUL-Centro	6,4	7	7,8	7,8	7,6	8,1	5,7	5,9	6,8	6,8	6,9	7	6,9
MD-08-Estanquinhos	6	5,9	6,5	7,1	7,1	8,2	7,7	4,6	7,5	7,5	6	5,4	6,6
MD-09-Porto Moniz	3,2	3,8	6,9	6,1	5,4	3,4	3,6	4,5	4,2	5,4	5,4	5,8	4,8
MD-10- Santa	3,7	5,5	3,3	4,3	3,9	4	3,9	3,1	3,6	4,7	3,7	3,9	3,9

Fonte: LREC/IBECK



Figura 2.4 Pormenor de recolha de dados de vento (Foto: F.Vieira)

Na sequência do estudo do vento para a elaboração desta tese e, utilizando os dados do IM e do LREC constatamos que o valor indicado do PAIM para o Areeiro não estava correcto, a velocidade média anual do vento no referido local é da ordem dos 5,8 m/s. Os valores obtidos para S. Jorge são iguais aos valores já registados. Na Figura 2.4 procede-se à recolha de dados anemométricos.

### 2.2.1.3 Programa de anemometria do Paúl da Serra e Caniçal

Para confirmar os dados obtidos no PAIM, desenvolvemos um novo programa de medição para os dois locais identificados como os mais promissores para a instalação de aerogeradores. Para o efeito, foram instaladas 3 estações anemométricas no Paúl da Serra, e 4 no Caniçal. Os novos dados confirmaram o Caniçal e o Paúl da Serra como adequados para a instalação de parques eólicos, embora o primeiro local com limitações em termos de espaço. No gráfico da Figura 2.5 podemos observar os valores registados em 1991, nas estações (MD-22-Norte, MD-20-Norte, MD-16-Sul e MD-21-Sul) e verificar que o Caniçal apresenta de facto valores interessantes para o aproveitamento eólico para fins energéticos. Na Figura 2.6 podemos ver a estação MD-22 junto ao parque eólico.

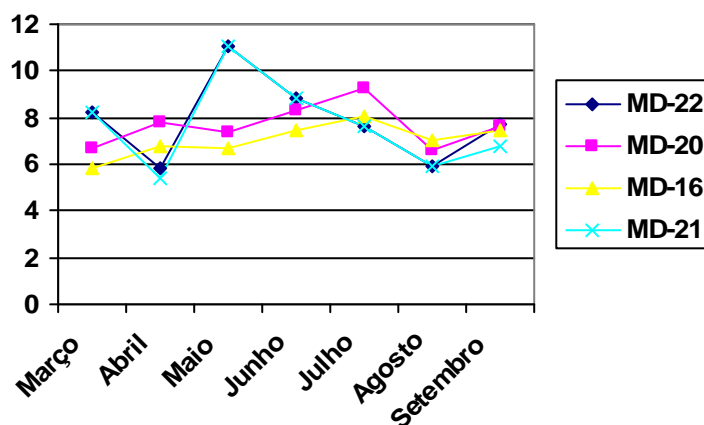


Figura 2.5 Comparação da velocidade do vento em 4 estações [un. m/s]

Os programas de anemometria, realizados pelo LREC e IBEK, foram fundamentais para o aparecimento de parques eólicos privados na ilha da Madeira, na sequência de legislação aprovada para o efeito (Decreto-Lei nº 189/88, de 27 de Maio) e do Programa Valoren. Este programa contribuiu para dinamizar a produção de energia a partir de recursos renováveis e

de outros processos que conduziam a economia de energia e contribuiu também para o desenvolvimento integrado das regiões na área da energia com consequências para a criação de emprego e melhoria do nível tecnológico local.



Figura 2.6 Caniçal, p.e. e estação anemométrica MD-21

O Decreto-Lei nº 189/88, de 27 de Maio, veio regulamentar a produção independente de energia eléctrica, pela utilização de recursos renováveis até um limite de potência de 10 MVA. Para além de admitir a expropriação por utilidade pública, estabeleceu os requisitos técnicos e de segurança para a ligação à rede receptora e as condições de facturação de energia pelo produtor. Durante os primeiros oito anos de produção, é dada ao produtor independente uma garantia do Estado sobre a receita pela energia fornecida.

Com apoios a fundo perdido do Programa Valoren foram instalados em 1992 e 1993, no Paúl da Serra três parques eólicos e em 1993, foi instalado um parque na Bica da Cana e outro no Caniçal, ambos do Grupo Pestana. De referir a nossa colaboração na elaboração dos projectos técnicos de dois dos parques, no que concerne à avaliação do recurso energético no local e pré-definição do equipamento. Com satisfação, registamos o facto do p.e. do Caniçal ter sido considerado o melhor da Europa na relação produção/potência, na década de noventa.

#### **2.2.1.4 Programa de anemometria da zona S-SO - ilha da Madeira**

Em 1999, a Empresa de Electricidade da Madeira procedeu a uma prospecção do vento na zona S-SO da ilha da Madeira no sentido de encontrar locais favoráveis à instalação de parques eólicos. Colaborámos com a EEM na escolha dos locais de prospecção, bem como na montagem das estações anemométricas. Na Tabela 2.4, indicam-se os valores então observados, (EEM, 1999).

Tabela 2.4 Medição de vento, zona S-SO - ilha da Madeira-1999 [ un:m/s] Fonte :EEM

Local	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Média
P. Pargo RDP		5,2	5,8	7,5	8,3	6,7
P.Pargo DSV		3,2	3,4	4,4	4,9	6,7
Fonte Bispo		6,4	7	8,7	10,4	8,13
Casa Elias 1P	3,3	3,8	3,7	4,7	5,2	6,24
Casa Elias 2P	4,2	5,1	4,3	5,5	6,1	4,8
Casa Elias 4P	6,5	6,7	6,3	7,8	9	7,45

Também no Caniçal efectuaram-se novas medições, tendo em vista viabilizar a instalação de um parque eólico na Zona Franca Industrial. Para o efeito, foram instaladas 2 estações anemométricas, uma constituída por um mastro com 40m de altura e dois anemómetros e a outra com mastro de 10 m e um anemómetro, estando esta localizada no parque eólico do Grupo Pestana, (EEM, GEP- 1998). Do referido programa foram observados os valores indicados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 Medição de vento Caniçal – 1999 - programa EEM (Fonte: EEM)

	Mastro 1 LREC	Mastro 2	EEM
Localização	p.e.Pestana	Zona Franca	Industrial
Altitude m	150	140	140
Altura do anemometro m	10	10	40
Período de medição	3 meses	5,2 meses	5,2 meses
Velocidade média m/s	8,16	4,92	6,54
Rajada máxima	25,3	33,97	27,71

### 2.2.1.5 Listagem dos programas de anemometria realizados na RAM 1982-2006

Vários foram os programas de anemometria realizados no arquipélago para fins energéticos. Na Tabela 2.6 apresenta-se uma listagem dos referidos programas.

### 2.2.1.6 O vento em locais de complexa topografia

Como é óbvio, o relevo da Madeira não é propício à instalação de grandes parques eólicos, à excepção do planalto do Paúl da Serra, pela extensão relativamente plana que apresenta. Por outro lado, não é tarefa fácil quantificar o potencial eólico de locais de complexa topografia. No estudo das características do vento e do potencial eólico no Paúl da Serra, realizado pelo INEGI em 2002, o Prof. Álvaro Rodrigues refere que a correcta quantificação do potencial eólico disponível para fins energéticos em locais de topografia complexa, apresenta muitas dificuldades. A modelação do escoamento em terrenos deste género traz várias complicações.

Tabela 2.6 Listagem dos programas de anemometria- RAM-1982-2006

Entidade	Local de prospecção	Período de medição	Observação
SRES	Ilha do Porto Santo	1982-1983	
SRES/KfW	Cabeço do Carvalho -Porto Santo	1983	
LREC/Ibeck	Ilha da madeira	1984	
LREC	Paúl da Serra e Caniçal	1993	
EEM	Zona Este e Caniçal	1998	
INEGI/PERFORM3	Paul da Serra	2005	
EEM/INEGI	Paul da Serra, Bica da Cana e Pico Gordo	2001	
LREC/FSD	Poiso/Areiro	2006-07	
LREC/LNEC/ANAM	Aeroporto da Madeira e Pico do Facho	2003-2007	Este programa não é para fins energéticos

Fonte: cm-LREC

Os modelos incorporados nos programas utilizados comercialmente recorrerem a algumas simplificações, (*Estanqueiro, 1997*) e (*Rodrigues, et al., 2002*). A linearização das equações fundamentais da Mecânica dos Fluidos deixa de parte fenómenos, como o deslocamento ou a recirculação, fenómenos tanto mais comuns quanto maior for a complexidade orográfica, (*Costa, et al., 2003*). Por outro lado, em zonas de complexa topografia é conveniente construir um modelo em escala adequada e proceder ao estudo do escoamento atmosférico em túnel de vento, para estudar os efeitos do relevo, *Miranda (2003)*, refere que o escoamento atmosférico sobre uma montanha com as características da ilha da Madeira é

fortemente influenciado pela estratificação atmosférica e por efeitos não lineares. Refere também que os modelos meteorológicos de mesoescala constituem a melhor aproximação disponível para o estudo dessa circulação. Pelo contrário, modelos de interpolação do campo de vento, largamente baseados em fórmulas empíricas bem ajustadas a observações de escoamento neutro sobre terreno suave, não são apropriados para o mapeamento do potencial eólico nestas condições (*Estanqueiro, et al., 1997*). Apesar de algumas dificuldades de ordem técnica, os p.e. justificaram os investimentos.

As dificuldades resultaram da dimensão reduzida das redes eléctricas da Madeira e Porto Santo, que torna a estabilidade do sistema eléctrico muito frágil, condicionado à componente de geradores assíncronos, como é o caso dos aerogeradores. Acresce, no caso da Madeira em que a estabilidade do sistema electroprodutor assenta numa componente termoeléctrica, na qual a regulação de frequências é feita através de um número mínimo de grupos térmicos. Ora, a energia por estes produzida, acrescida da produção das 10 centrais hídricas, é em alguns períodos suficiente para satisfazer a procura, especialmente, no período de Inverno e nas horas de vazio, não restando espaço para a penetração da energia eólica.

Com a recente entrada em funcionamento da Central de Fins Múltiplos dos Socorridos, este problema ficou resolvido, permitindo a injeção de mais energia renovável no sistema electroprodutor. Na Figura 2.7 podemos observar dois p.e. instalados no Caniçal e a complexidade do relevo no local.



Figura 2.7 Parques eólicos do Caniçal em 2001

O maior parque eólico do Caniçal constituído por 5 aerogeradores de 660 kW de potência unitária, teve que ser transferido para o Paúl da Serra, dado que o seu funcionamento apresentava graves riscos para o equipamento, provocados por turbulências e outros. Em nosso entender, a falta de um estudo anemométrico adequado (o período de medição foi muito reduzido), bem como a inexistência de um ensaio em túnel de vento, dada a complexidade do relevo do local, estiveram na base do sucedido.

A experiência diz-nos que em locais de complexa topografia é conveniente estudar os locais, durante um período de tempo de pelo menos três anos, utilizando anemómetros calibrados e correctamente instalados, bem como estudar o vento em altitude e a influência do relevo neste.

## **2.2.2 Estudos e projectos de aproveitamento de energias renováveis**

### **2.2.2.1 Casa solar do Porto Santo**

Participámos no acompanhamento técnico da construção da Casa Solar do Porto Santo, (Figura 2.8), projecto de autoria do arquitecto Gunther Ludwig. Tratou-se de um projecto inovador na área da construção de edificios, onde houve uma preocupação de encontrar soluções, tendo em atenção as potencialidades da energia solar, quer para aquecimento no Inverno, quer para efeitos de iluminação natural, quer mesmo para o arrefecimento na estação de Verão (*Ludwig, 1987*). A este tipo de arquitectura, tem sido atribuída a designação de arquitectura solar, arquitectura bioclimática ou arquitectura solar passiva, (*Gonçalves et al., 1997*). A Casa Solar tinha como função apoiar uma estação piloto de dessalinização solar da água do mar, construída nas suas imediações.

A Casa Solar, como características, apresenta paredes de trombe e utiliza várias técnicas de arrefecimento e aquecimento passivo. É um edificio concebido de modo a utilizar a energia solar como meio principal para o aquecimento ambiente no período de Inverno, integrando, para tal, paredes de trombe<sup>6</sup> na fachada Sul, (*Ludwig, 1987*). No período de Verão são utilizadas técnicas de arrefecimento pelo solo, no qual o ar é arrefecido em tubagem enterrada e introduzido na casa, através de ventilação cruzada e aspirada por efeito de chaminé (Figura

---

<sup>6</sup> Parede de trombe- parede acumuladora de calor desenvolvida em França por Felix Trombe

2.9). De referir a utilização de areia da praia para o aumento da massa térmica dos blocos de betão, utilizados na construção das paredes.



Figura 2.8 Casa Solar do Porto Santo- fachada Sul



Figura 2.9 Entrada de ar – fachada Norte

### 2.2.2.2 Estação piloto de dessalinização solar - Porto Santo

Este projecto surgiu da necessidade de se estudar novos processos de produção da água doce. A ilha é bastante carenciada em água doce, mais de 80 % desta é produzida numa central dessalinizadora por osmose inversa, com custos de produção muito elevados, cerca de 15 kWh/m<sup>3</sup>. Como a Technische Universität Berlin-Interdisziplinäre Projektgruppe für Angepasst Technologie-TUB-IPAT tinha desenvolvido investigação no domínio da dessalinização solar, o governo alemão financiou a construção de uma Estação Piloto de dessalinização solar da água do mar, (Figura 2.10), com base num projecto elaborado pela referida universidade em 1982. Foram então construídos para o efeito no local 4 destiladores solares, de 15m<sup>2</sup> cada, sendo dois do tipo tradicional ou estufa, conhecidos também por *green-house*, e os outros dois modelos concebidos pela TUB-IPAT designados por destiladores de duplo ciclo (Janisch, 1983). A produção de água doce dos destiladores *green-house* situou-se nos 2 a 3 litros/dia/m<sup>2</sup> de área do destilador, e a produção dos destiladores concebidos pela Universidade ficou muito aquém dos objectivos propostos que eram de 4 a 6 litros/dia/m<sup>2</sup> (Janisch, 1987). A produção dos destiladores concebidos pela TUB-IPAT foi superior apenas em 5 % à produção dos destiladores *green-house* (Magro, 1991).

No que concerne à dessalinização da água para consumo, o Porto Santo foi dos primeiros locais a nível mundial a utilizar uma central dessalinizadora. Esta central também foi das primeiras a utilizar turbinas de recuperação de energia (Figura 2.11). O projecto de adaptação

e instalação das turbinas de recuperação de energia na central do Porto Santo é da autoria dos engenheiros F. da Silva e A. Camacho, tendo este projecto sido participado pelo Valoren na sequência de um estudo técnico que elaborámos, (*Doc. Programa Valoren*).



Figura 2.10 Estação piloto de dessalinização solar - 1983

As referidas turbinas do tipo Pelton, aproveitando a água de rejeição à pressão de 70 bar, estavam ligadas ao veio do motor eléctrico através de um sistema de tambores e correias, e assim contribuíam para uma redução de energia eléctrica da ordem dos 12 % por m<sup>3</sup> de água dessalinizada. A partir desta experiência, todos os sistemas de dessalinização por *osmose inversa* começaram a incluir turbinas de recuperação de energia. O Porto Santo foi um marco histórico no avanço tecnológico. Na Figura 2.11 podemos ver uma panorâmica da Central Dessalinizadora e da turbina de recuperação de energia.

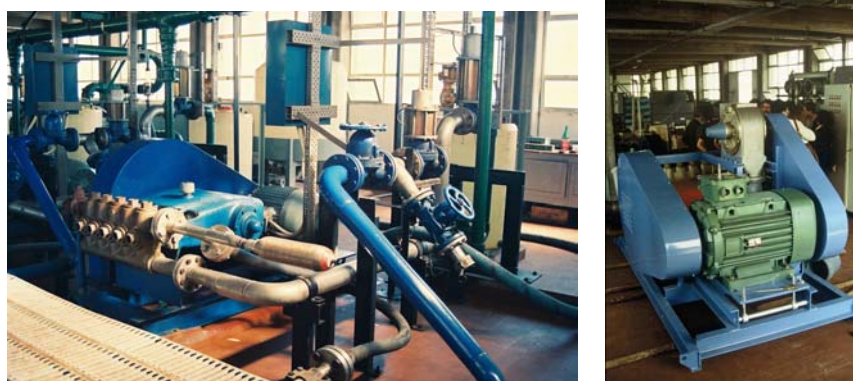


Figura 2.11 Panorâmica da central dessalinizadora e turbina de recuperação de energia

### 2.2.3 Estudo da energia das ondas do mar

No período de 1993 a 1997, integrado num grupo de trabalho constituído pela Dr<sup>a</sup>. Teresa Pontes do INETI, Prof. José Falcão do IST e Dr. Oliveira Pires do INMG, procedeu-se a uma caracterização do recurso energético das ondas marítimas nas ilhas da Madeira e Porto Santo, tendo sido desenvolvido um programa de prospecção para o efeito. Foram estudados vários locais, visando a instalação de uma central das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO). Para uma primeira abordagem ao potencial das ondas, ao largo da Vila do Porto Moniz, na ilha da Madeira, foi instalado um ondógrafo a uma milha da costa e na batimetria dos 100 m e na referida vila, num canal junto ao antigo forte, foi colocada uma sonda de nível. Na sequência dos dados recolhidos, foi estimado um potencial de 29 kW/m/ano para a Madeira, valores medidos ao largo. Acresce que o Atlas Europeu da Energia das Ondas apresenta para a Madeira o valor anual de 29,23 kW/m/ano, valor estatístico verificado entre 1987-1994. Apesar do valor ser inferior ao valor estimado para os Açores (43 kW/m/ano), a Madeira apresenta a vantagem do seu potencial ser muito regular ao longo do ano, contrariamente aos Açores que sofre grandes variações nos períodos de Verão e Inverno (*Pontes, T., 1994*). Nas Figuras 2.12 e 2.13 podemos observar o sistema de recepção de dados do ondógrafo, bem como os preparativos de lançamento deste no mar, ao largo do Porto Moniz.



Figura 2.12 Estação de recepção de dados

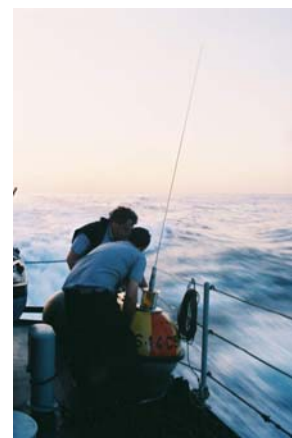


Figura 2.13 Lançamento do ondógrafo

### 2.2.4 Estudo de viabilidade de produção de biogás

No domínio do aproveitamento de biogás, participámos em 2004 na elaboração do estudo de viabilidade de produção de biogás a partir de excrementos de suínos de três explorações, localizadas no Santo da Serra. O estudo foi coordenado pelo INETI em colaboração com a

Universidade de Évora e uma empresa de projectos e instalações de produção de biogás. O referido estudo aponta para uma produção diária de efluente de 140 m<sup>3</sup> e uma produção de biogás de 1.847 m<sup>3</sup>/dia, correspondendo a um equivalente de energia eléctrica de 3.374 kWh, com uma potência de cogeração de 281 kW, (INETI, LREC, 2004).

### **2.2.5 Projecto EULER XXI - Edifício unidade laboratorial de energias renováveis**

No âmbito do Plano de Desenvolvimento Económico e Social da Região Autónoma da Madeira, para 2007-2013, elaborámos um estudo prévio do Projecto EULER XXI. Este estudo visa dotar o LREC com uma unidade laboratorial de alto desempenho tecnológico, que irá permitir executar na prática, projectos de I&D de energias renováveis (solar térmica, solar passiva e solar fotovoltaica), de acústica e da qualidade do ar no interior do edifício. Esta unidade, integrará laboratórios, gabinetes, salas de formação e oficina. Serão utilizadas tecnologias solares passivas para aquecimento e arrefecimento dos espaços funcionais, e sistemas de aproveitamento de energia solar para aquecimento de águas e produção de electricidade, sendo para o efeito instalados colectores solares térmicos e módulos fotovoltaicos. Estes sistemas serão monitorizados. Acresce que a térmica e acústica dos espaços funcionais será tida em conta, com a utilização de novos e adequados materiais. A iluminação natural será utilizada visando a economia de energia.

## **2.3 INSTALAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E HÍBRIDOS**

### **2.3.1 Instalação de sistemas fotovoltaicos**

#### **2.3.1.1 Selvagem Grande. A primeira Instalação Fotovoltaica de Portugal – 1983**

Em 1983, surge a necessidade de se instalar um sistema energético na Selvagem Grande, pequena ilha que fica a 162 milhas marítimas da Madeira, para fornecimento de electricidade à casa dos vigilantes, que permanecem continuamente no local, (Figura 2.14). Era necessário compatibilizar a presença humana e as suas actividades com a necessidade de preservar as ilhas Selvagens como importantes Santuários Ornitológicos no Atlântico Norte, dadas as suas

características peculiares de local de nidificação e refúgio de aves marinhas, nomeadamente cagaras, almas negras, calcamares, roques de castro e pintainhos, (Neves, 1990).

Nesse sentido a SRES estudou a viabilidade de instalação de um sistema autónomo para a produção de electricidade para a referida casa da Selvagem Grande, visando os seguintes objectivos: utilizar um recurso energético local e renovável, fornecer energia suficiente para as tarefas dos vigilantes, reduzir o consumo de gásóleo ou gasolina e resistir às condições climáticas do local. A opção energética foi a utilização do Sol para produção de electricidade, através de um sistema electro-solar que, utilizando células fotovoltaicas, converte directamente a energia luminosa em electricidade (Brito, 2005). Foi a primeira instalação fotovoltaica do país do tipo *stand alone*.



Figura 2.14 Ilha Selvagem Grande



Figura 2.15 Instalação fotovoltaica e destilador solar, Selvagem Grande, 1985

Na altura, foi um projecto de tecnologia de ponta, com alguns riscos, tais como o desconhecimento da tecnologia e sobretudo a sua fiabilidade. Teria de ser um sistema fiável pois, no caso de avarias frequentes, não seria fácil fazer deslocar um técnico ao local, (Magro,

2002). A instalação foi dimensionada por forma a ser auto-suficiente para duas pessoas. O sistema era constituído por vinte painéis de células de silício monocristalino de 36 Wp cada, da marca B.P. Solar, com uma potência total instalada de 720 Wp, oito baterias do tipo sem manutenção (de 105 Ah, da marca Delco), um regulador de carga (constituído por uma unidade de controlo electrónico com alarme de tensão alta e baixa e corte automático) e dois conversores para corrente contínua de 24 V/12 V, Figuras 2.16 e 2.17. Os aparelhos de iluminação, frigorífico, televisor e rádios, funcionavam a 24 V DC. Entretanto, em 1984, procedemos ao aumento da potência da instalação fotovoltaica da Selvagem, acrescentando mais dois painéis de 36 Wp, ficando com um total de 792 Wp (Figura 2.15).

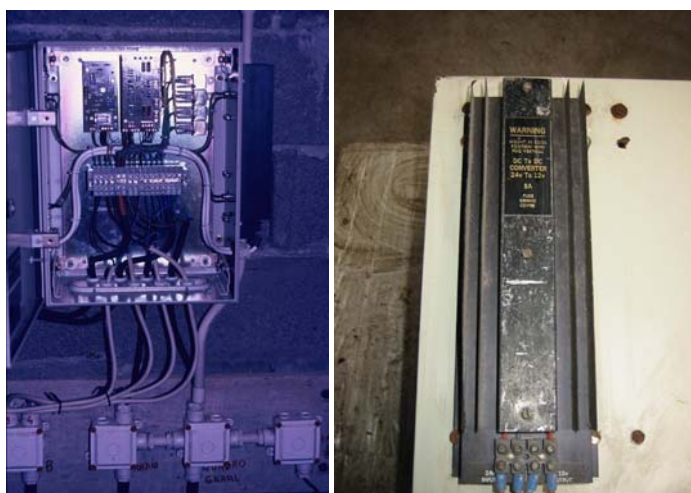


Figura 2.16 Regulador de carga e conversor, 12V/24V

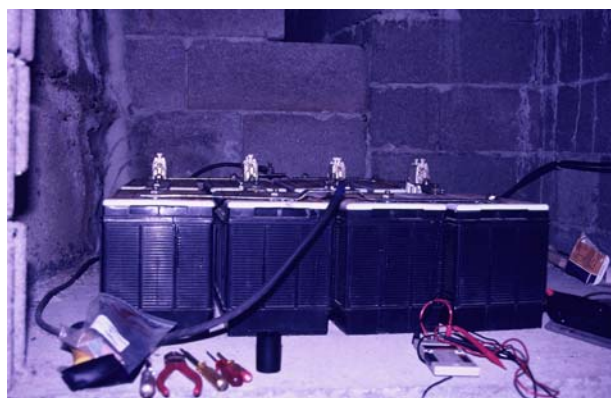


Figura 2.17 Banco de baterias, 8 x 105 Ah

O sucesso da instalação da Selvagem Grande permitiu dissipar algumas dúvidas sobre a fiabilidade dos sistemas fotovoltaicos e motivou os decisores a apoiarem novos projectos. Deste modo, temos vindo a projectar, instalar e monitorizar vários sistemas fotovoltaicos e híbridos (fotovoltaicos-eólicos) para produção de electricidade em casas isoladas, espalhadas

pelo arquipélago. A Figura 2.18, reporta-se a uma visita de manutenção à instalação da Selvagem Grande realizada em 2005. Acresce que ao longo de cerca de 24 anos, temos tido oportunidade de acompanhar a evolução tecnológica dos equipamentos. A título de exemplo, e para ilustrar o que se disse, podemos observar a evolução tecnológica dos reguladores de carga (que passaram de dezenas de quilos a dezenas de gramas) nas Figuras 2.16 e 2.19.



Figura 2.18 Selvagem Grande, visita de manutenção



Figura 2.19 Regulador de carga – 2005

Na Tabela 2.7 apresenta-se um resumo das características principais dos sistemas fotovoltaicos e híbridos, instalados no arquipélago, bem como o número de utilizadores. Em Anexo, apresentam-se quatro Tabelas com as características técnicas de todas as instalações híbridas e fotovoltaicas do LREC.

### **2.3.1.2 Selvagem Pequena**

Trata-se de uma instalação fotovoltaica destinada a fornecer electricidade a um Posto de Vigilância do Parque Natural da Madeira, localizado na pequena ilha do sub-arquipélago das Selvagens, situado no Oceano Atlântico a 30° de latitude Norte e a 16 ° de longitude Oeste.

Este posto funciona de Março a Outubro com dois vigilantes. A instalação fotovoltaica é móvel, tendo que ser montada e embarcada todos os anos, sofrendo as consequências do transporte anual, por vezes, em condições muito críticas, devido ao estado do mar. Na Figura 2.20, podemos observar a dimensão da pequena ilha, e nas Figuras 2.21 e 2.22 apresentam-se dois sistemas fotovoltaicos de diferentes materiais (monocristalino e policristalino), utilizados em 1996 e 2006 na referida ilha.

Tabela 2.7 Características dos sistemas fotovoltaicos do LREC

Local	Potência Wp	Inversor W	Baterias Ah	Nº de utilizadores
Selvagem G. I 1983	720	1500	600	Posto Vigilância 2 utilizadores
Selvagem G. II 1996/2004	1200	3300	650	Posto de Vigilância 2 a 4 utilizadores
Selvagem P. I 1996	256	450	360	Posto Vigilância 2 utilizadores
P.S. Lourenço 1998	616	1500	630	Posto Vigilância 2 utilizadores
S. Martinho 2003	1280	3300	1200	Iluminação Pública
Prazeres 2004	1280	3300	1200	Força Motriz
Terra Chã 2004	500	450	380	Casa Florestal 2 utilizadores
Ilhéu Chão 2004	256	450	380	Posto Vigilância 2 utilizadores
Bica da Cana 2003	1600	3300	1500	Casa Florestal 2 a 4 utilizadores
Cova Grande 2006	1280	3300	1200	Posto Florestal 2 a 4 utilizadores
Funduras 2007	1600	3300	2000	Casa Florestal 2 a 4 utilizadores
S. Martinho II 2006	500	450	380	Força Motriz
Torre Pico do Suna 2007	500	450	380	Torre de Vigilância 2 utilizadores
Torre Fonte do Bispo 2007	500	450	380	Torre de Vigilância 2 utilizadores



Figura 2.20 Ilha Selvagem Pequena



Figura 2.21 Sistema monocristalino - 1996



Figura 2.22 Sistema policristalino 2006

### 2.3.1.3 Casa do Sardinha-Ponta de São Lourenço

Na ponta Este da ilha da Madeira, conhecida por Ponta de São Lourenço, funciona desde 1998 um sistema fotovoltaico destinado a fornecer electricidade para a “Casa do Sardinha”, Posto de Vigilância do Parque Natural da Madeira. Este Posto tem dois utilizadores em permanência. A Figura 2.23 mostra-nos o gerador fotovoltaico e o restante equipamento.



Figura 2.23 Casa do Sardinha, gerador fotovoltaico e banco de baterias

### **2.3.1.4 Projecto PAUER - Instalação de sistemas fotovoltaicos e híbridos**

Este projecto insere-se num conjunto de intervenções técnicas, visando a promoção e a utilização de energias renováveis. Baseia-se em três vertentes principais: prospecção e avaliação de recursos endógenos, criação de uma base de dados específica para projectos multidisciplinares, bem como a instalação de sistemas energéticos renováveis em locais isolados, para produção de electricidade e outras aplicações, nomeadamente, secadores e estufas solares. Através do PAUER instalaram-se os seguintes sistemas:

#### **2.3.1.4.1 Selvagem Grande**

Tratam-se de duas instalações fotovoltaicas destinadas a fornecer electricidade à estação do Parque Natural da Madeira, localizada na Selvagem Grande. Esta Estação de Vigilância tem carácter permanente, sendo ocupada por dois vigilantes, havendo períodos em que o número de utilizadores triplica. Devido às dificuldades de transporte e ao isolamento da ilha, o sistema fotovoltaico é fundamental para a qualidade de vida e segurança das pessoas. A Figura 2.24 dá-nos uma panorâmica das duas instalações existentes na Selvagem Grande.



Figura 2.24 Instalações fotovoltaicas da Selvagem Grande, 2005

Na Figura 2.25 podemos analisar o comportamento da instalação da Selvagem Grande num dia de Primavera no que concerne a radiação solar, tensão e corrente. O gráfico foi obtido com dados de medições efectuadas, aquando da montagem do último sistema fotovoltaico. As características técnicas dos equipamentos das instalações fotovoltaicas estão indicadas em Anexo.

#### **2.3.1.4.2 Bica da Cana**

Trata-se de uma instalação fotovoltaica destinada a fornecer electricidade a uma Casa Florestal da Direcção Regional de Florestas, localizada no Concelho da Calheta, na ilha da Madeira. Esta casa tem em permanência dois guardas florestais e está localizada no Paúl da Serra. Na Figura 2.26 podemos observar o gerador, banco de baterias, reguladores e inversor da referida instalação.

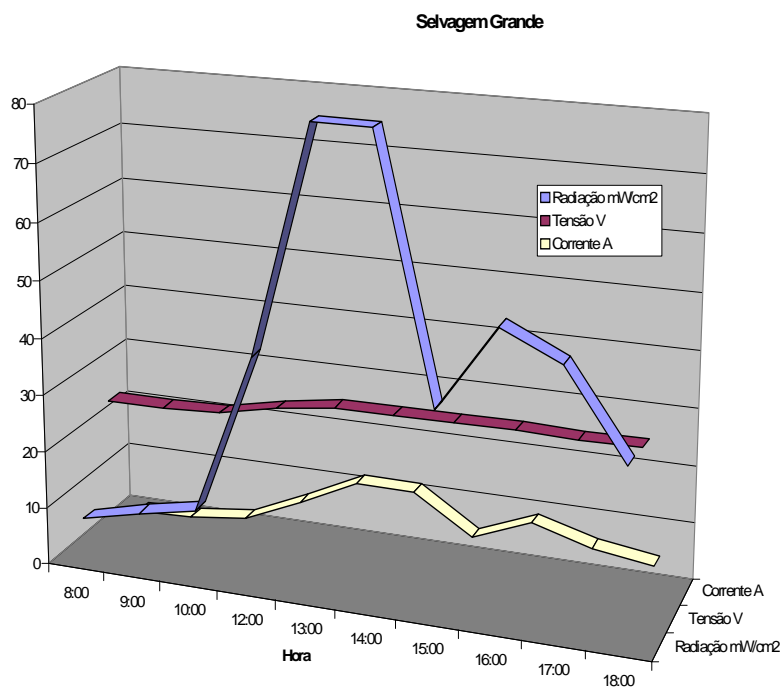


Figura 2.25 Dia de Primavera, valores de tensão, corrente e radiação solar



Figura 2.26 Bica da Cana, gerador FV, banco de baterias, reguladores e inversor

### 2.3.1.4.3 Secador Solar -Prazeres-Quinta Pedagógica

Esta instalação fotovoltaica está integrada num sistema solar de fins múltiplos, destinado a secagem de ervas aromáticas através da energia solar. O sistema é constituído por um colector solar térmico, um colector solar a ar com 10m<sup>2</sup> e um sistema fotovoltaico (Figura 2.27). A função do sistema fotovoltaico é produzir electricidade para a ventilação e deshumidificação do secador solar de ervas aromáticas. Na Figura 2.28 podemos observar o referido secador de ervas, bem como a conduta de entrada do ar quente. A Figura 2.29 apresenta uma vista do banco de baterias, reguladores de tensão e inversor. As características técnicas dos equipamentos das instalações fotovoltaicas estão indicadas em Anexo.



Figura 2.27 Sistemas solares fotovoltaico e térmicos (ar e água)



Figura 2.28 Secador Solar



Figura 2.29 Banco de Baterias

#### 2.3.1.4.4 Pico Branco-Porto Santo

Trata-se de uma pequena instalação fotovoltaica para fornecimento de electricidade a uma Casa da Direcção Regional de Florestas, localizada na ilha do Porto Santo. Esta casa está integrada num centro de reprodução de plantas endémicas, servindo de residência para 2 técnicos durante 5 dias por semana. As características técnicas dos equipamentos das instalações fotovoltaicas estão indicadas em Anexo.

#### **2.3.1.4.5 Cova Grande**

Trata-se de uma instalação fotovoltaica localizada no Concelho da Calheta na ilha da Madeira, destinada a fornecer electricidade a uma Casa Florestal da Direcção Regional de Florestas para dois guardas florestais em permanência. As características técnicas dos equipamentos das instalações fotovoltaicas estão indicadas em Anexo.

### **2.3.2 Instalação de sistemas híbridos (fotovoltaico-eólico)**

Os sistemas híbridos de energia são sistemas autónomos de produção de electricidade, que combinam fontes de energia renovável (radiação solar, vento ou água) e geradores convencionais. O objectivo é produzir o máximo de energia possível a partir de fontes renováveis.

Os sistemas híbridos são normalmente constituídos por módulos fotovoltaicos e uma outra fonte de energia auxiliar, renovável ou não, por um banco de baterias electroquímicas para armazenamento da energia eléctrica e um ou vários inversores que convertem a corrente contínua em corrente alternada. A energia é distribuída aos utilizadores em corrente alterna, *(Bagul, et al., 1996), (Joyce, 2000), (Castro, 2004) e (Pereira, 2006)*.

As fontes auxiliares de energia podem ser geradores a gasóleo, gasolina, gás, ou ainda, se o recurso o justificar, aerogeradores ou turbinas hidráulicas, *(Rodrigues et al., 2003)*. A partir de 2002 começámos a instalar sistemas híbridos para aproveitar ao máximo os recursos solares e eólicos dos locais, por forma a garantir os consumos mínimos necessários. Contudo, a experiência diz-nos ser necessário dispor de dados fiáveis e representativos da radiação solar, temperatura e vento do local, pois só assim é possível com segurança executar projectos híbridos (fotovoltaico-eólico), dada a complexidade climatológica e orográfica da ilha ou

ilhas. Nem sempre é possível aproveitar eficazmente o recurso energético disponível, na medida em que, por vezes, os locais de consumo estão situados em zonas pouco favoráveis à exposição solar, nomeadamente próximo de escarpas abruptas (exemplo da Deserta Grande, Figura 2.30), ou em zonas de muita nebulosidade, provocada pelos ventos Alíseos que, ao treparem as vertentes, dão origem à formação frequente de nuvens e nevoeiros, exemplo a Figura 2.31 (Miranda, 2002). Este fenómeno na Madeira tem lugar numa zona compreendida entre os 700m e 1300m da altitude. Portanto, é necessário fazer uma avaliação correcta ao potencial de radiação solar e vento existente em todos os locais onde se pretende instalar qualquer sistema híbrido.



Figura 2.30 Vista aérea da Deserta Grande



Figura 2.31 Encumeada, passagem de nuvens N/S.

### **2.3.2.1 Instalação híbrida da Deserta Grande**

Trata-se de uma instalação híbrida (fotovoltaica-eólica) destinada a fornecer electricidade a uma Estação do Parque Natural da Madeira, localizada na Deserta Grande. Esta estação tem carácter permanente, sendo ocupada por dois vigilantes, havendo períodos em que o número de utilizadores da casa triplica. Este sistema híbrido, que inicialmente tinha sido instalado junto à casa dos vigilantes, próximo da falésia (Figura 2.32), teve que ser deslocado, em 2005, para outra zona, uma vez que corria o perigo de ficar soterrado, devido a problemas provocados por derrocadas. Entretanto, e, por razões de segurança, foi construída uma nova casa, mais afastada da falésia e mais próximo do mar, junto à qual ficou localizado o sistema híbrido, melhorando, deste modo, as suas condições de captação de energia solar e vento (Figura 2.33).

As características técnicas dos equipamentos das instalações híbridas estão indicadas em Anexo.

### 2.3.2.2 Instalação híbrida dos Estanquinhos

A instalação dos Estanquinhos é do tipo híbrida (fotovoltaica-eólica) e produz electricidade para a Casa Florestal da Direcção Regional de Florestas, localizada no Concelho da Calheta na ilha da Madeira. Nesta casa estão em permanência dois guardas florestais.



Figura 2.32 Deserta Grande, sistema FV-E -2002



Figura 2.33 Nova estação de vigilância e sistema híbrido da Deserta Grande, 2005

Na Figura 2.34 podemos observar uma vista geral do sistema híbrido, bem como o aerogerador em funcionamento em pleno Inverno. As características técnicas dos equipamentos das instalações híbridas estão indicadas em Anexo.



Figura 2.34 Sistema híbrido dos Estanquinhos

### 2.3.2.3 Instalação híbrida do Fanal

Trata-se de uma instalação híbrida (fotovoltaica-eólica) destinada a fornecer electricidade a um Posto Forestal da Direcção Regional de Florestas, localizado no Concelho do Porto Moniz, na ilha da Madeira. Este posto funciona com dois guardas florestais em permanência (Figura 2.35). Trata-se de um local com muito nevoeiro e muito problemático em termos de exposição solar, mas apresentado, em contrapartida, muitos dias com um potencial eólico interessante.



Figura 2.35 Fanal, sistema híbrido, inversor e reguladores

Nesta instalação temos a registar a destruição do aerogerador e sistema eléctrico e electrónico, provocado por descargas eléctricas provenientes de relâmpagos, bem como de ventos muito fortes, que danificaram a torre de suporte do aerogerador (Figura 2.36). Este local tem sido o mais problemático em termos do recurso energético e condições de funcionamento. As características técnicas dos equipamentos das instalações híbridas estão indicadas em Anexo.



Figura 2.36 Aerogerador acidentado por ventos muito fortes

### 2.3.2.4 Características básicas das instalações híbridas (fotovoltaico-eólico) do LREC

Na Tabela 2.8 descrevem-se sucintamente as características de instalações híbridas que projectamos e instalámos:

Tabela 2.8 Características dos sistemas híbridos do LREC

Local	Gerador Fotovoltaico Wp	Aerogerador W	Baterias Ah	Nº de utilizadores
Deserta Grande I 2002	1232	500	1200	Posto Observação 2 a 4 utilizadores
Deserta Grande II 2005	1232	500	1200	Posto Observação 2 a 4 utilizadores
Estanquinhos 2002	1200	400	750	Posto Florestal 2 a 4 utilizadores
Fanal 2003	640	1500	1500	Posto Florestal 2 a 4 utilizadores
Casa do Burro 2007	1280	400	1500	Posto Observação 2 a 4 utilizadores

### 2.3.2.5 A problemática dos sistemas fotovoltaicos e híbridos junto ao mar

Desde 1984, temos vindo a acompanhar o funcionamento das instalações fotovoltaicas e híbridas espalhadas pelo arquipélago, através da manutenção preventiva e reparação de avarias, especialmente nas ilhas Selvagens e Desertas (*Magro, 2004*). Contrariamente ao que é referido por alguns autores, a manutenção de sistemas fotovoltaicos e eólicos, junto ao mar, é problemática, dispendiosa e complexa, dado que a corrosão marítima é bastante agressiva, provocando por vezes danos irreparáveis nos reguladores de carga, conversores e até em aparelhos de uso doméstico e de telecomunicações. Nos cerca de 24 anos de manutenção, tivemos que substituir alguns módulos fotovoltaicos, dado que estavam degradados e partidos

devido à acção do mar. Na Figura 2.37 podemos observar o efeito da agressividade marítima em módulos Solarex.

Esta situação ocorre em locais muito próximo do mar e tem que ser equacionada na fase de projecto das instalações. É necessário prever a necessidade de substituição de componentes básicas, nomeadamente, reguladores de carga e inversores, antes destes terem atingido o tempo de vida útil (indicado pelos fabricantes para situações de normal funcionamento).



Figura 2.37 Degradação de módulo fotovoltaico- Deserta Grande

Outro problema a ter em consideração é o tipo de acondicionamento para o transporte marítimo dos diversos componentes das instalações até ao local de montagem. Com efeito, nas ilhas isoladas, Desertas e Selvagens o transporte é feito por via marítima, implicando o transbordo entre barcos e o desembarque no destino final através da utilização de botes pneumáticos (Figura 2.38).



Figura 2.38 Transporte e desembarque de equipamento

Nestas situações, as embalagens com os módulos, reguladores, inversores e baterias, podem ser facilmente atingidos com a água do mar, mesmo em situações de mar calmo. Por outro lado, o desembarque pode provocar perdas e danos irreparáveis nos componentes,

especialmente nas baterias atendendo ao seu peso (Figura 2.39). As fotos abaixo indicadas dão uma ideia da dificuldade de transportar os equipamentos entre ilhas.

Deste modo, a preparação das embalagens de todos os componentes, bem como o seu transporte até ao destino final devem ser muito bem planeados. Isto implica a utilização de melhores embalagens e, conseqüentemente, o aumento de custos. A corrosão do mar é violenta e rápida e todos os cuidados são poucos. A Figura 2.40 apresenta a distribuição geográfica dos sistemas fotovoltaicos, híbridos e parques eólicos existentes na RAM.



Figura 2.39 Desembarque de baterias, Deserta Grande

## 2.4 ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE REDES METEOROLÓGICAS

No âmbito das atribuições do DHTE temos vindo a instalar redes de udometria, anemometria, radiação solar, temperatura e humidade do ar e, recentemente, uma rede de estações meteorológicas automáticas. O objectivo é dispor de dados fiáveis para avaliação de recursos naturais, nomeadamente hídricos, eólicos e solares. Conhecer o clima e os recursos renováveis em particular, é condição prévia para a realização de estudos e implementação de sistemas para aproveitamento das energias renováveis técnica, e economicamente viáveis (*Vázques, et al., 2003*).

### 2.4.1 Redes Meteorológicas do LREC

No âmbito do Projecto PAUER já referido, e na sua vertente da prospecção de recursos energéticos e criação de uma base de dados, projectámos e instalámos as seguintes redes, cujas características estão indicadas na Tabela 2.9: rede de anemometria - ANEM, constituída

por 12 estações, tendo por objectivo a recolha de dados de vento em novos locais de prospecção e, eventualmente, apoiar outros estudos; rede de udometria - UDM, constituída por 35 estações, distribuídas pelo arquipélago e destinada a apoiar o estudo dos recursos hídricos; rede de temperatura, humidade relativa do ar e radiação solar - THRS, destinada a recolher dados para projectos de térmica de edifícios, solares térmicos e fotovoltaicos e, finalmente, a rede de estações meteorológicas automáticas, designada por REMA, constituída por nove estações, sete na ilha da Madeira, e as restantes na Deserta e Porto Santo.

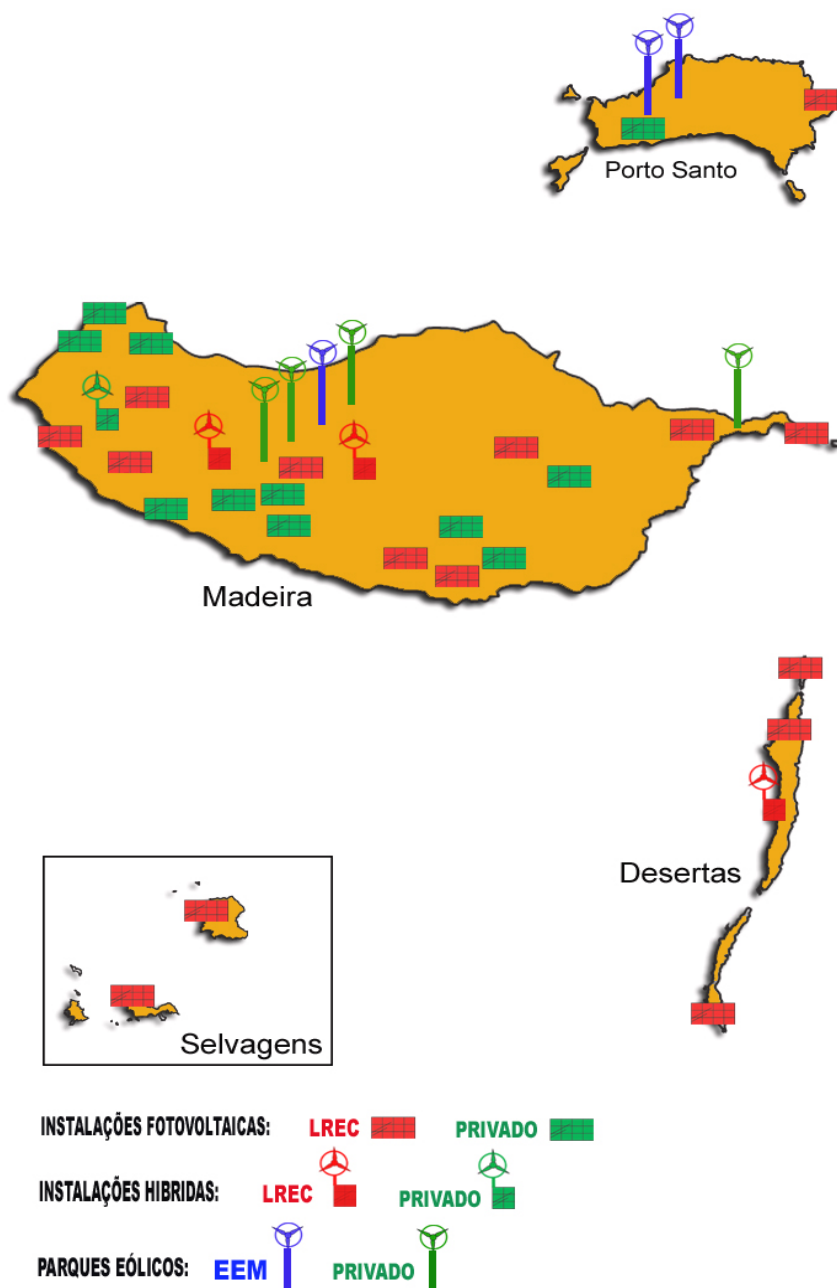






Figura 2.40 Distribuição geográfica dos sistemas fotovoltaicos, híbridos e parques eólicos existentes na RAM (Fonte: Monizzi)

O sucesso de muitos projectos de I&D nas áreas da engenharia, como a hidráulica, energia, geotecnia, ambiente, ecologia e outros, depende da quantidade e qualidade dos dados disponíveis. O objectivo funcional da REMA é massificar um grande leque de dados meteorológicos numa única base de dados. Como resultado disso poderemos disponibilizar os dados, de um modo seguro e rápido, para qualquer projecto multidisciplinar ou entidade. Devido às características microclimáticas da região, optamos por estrategicamente criar uma rede de estações meteorológicas caracterizada, essencialmente, pela sua distribuição geográfica na RAM, tendo em atenção as estações já existentes do Instituto de Meteorologia, (Magro *et al.*, 2006). Todas as EMAs estão equipadas com sensores para medição da temperatura e humidade relativa do ar, precipitação, pressão atmosférica, radiação solar, temperatura da relva e vento (velocidade e direcção). O sistema de aquisição centralizado em São Martinho (Figura 2.41) está programado para proceder à recolha diária remota dos dados. A aquisição remota é efectuada, quer pelo uso da rede pública GSM, quer por via da rede de comunicações privativa do LREC.

Tabela 2.9 Redes meteorológicas do LREC

Tipo de Rede	Número de estações	Tipo de Estação	Local
Anemometria (ANEM)	12 Estações 	Temporária	Ilha da Madeira
Udometria (UDM)	35 Estações 	Permanente	Ilha da Madeira, Selvagem Grande, Deserta Grande
Temperatura, Humidade e Radiação Solar (THRS)	12 Estações 	Permanente	Ilha da Madeira Selvagem Grande, Deserta Grande
Estações Meteorológicas Automáticas (REMA)	9 Estações 	Permanente	Ilha da Madeira Ilha do Porto Santo Ilha Deserta

Em caso de falha de comunicações, as EMAs estão equipadas com um sistema de memória não volátil, que permite manter os dados por vários dias, até que as comunicações sejam

retomadas. Assim, e de forma automática, os dados, depois de recebidos, são previamente verificados e armazenados numa base de dados SQL. O programa de suporte informático executa automaticamente um procedimento de detecção de anomalias, que permite garantir a qualidade dos dados sem recurso à intervenção humana, (Neves, *IT-DHTE*, 2005).

Acresce que esta rede, devidamente programada, poderá emitir alarmes, em tempo real, de interesse para diversos serviços de protecção civil. Os alarmes podem ser programados para diferentes limites e podem ser enviados através da internet ou com o recurso ao serviço SMS directamente para qualquer telemóvel previamente autorizado.



Figura 2.41 Concentrador da REMA localizado no LREC

Alguns exemplos de alarmes podem ser do tipo:

- Intensidade média do vento em 10 min > 15 m/s;
- Intensidade do vento instantâneo > 23 m/s;
- Quantidade de precipitação em 10 min > 5 mm;
- Temperatura do ar < 1° C ou > 40 ° C.

A implementação desta rede, a médio prazo, irá colmatar uma grave lacuna na região, no que se refere à inexistência massiva de dados meteorológicos históricos, em quantidade e qualidade, utilizáveis para estudos de *I&D* e ainda importantes para a protecção civil (Neves, *IT-DHTE-2005*).

## 2.4.2 Características dos instrumentos de medição meteorológica

Nas Tabelas 2.10, 2.11, 2.12 e 2.13 apresentam-se as principais características técnicas dos instrumentos de medição, das unidades de aquisição de dados bem como do software utilizado e na Tabela 2.14 as características técnicas dos sensores.

Tabela 2.10 Rede de anemometria – ANEM

Unidade de aquisição de dados	Tipo de Sensores	Aplicação Informática	Bateria e apoio solar
Campbell Scientific CR510	Sensor de Velocidade NRG 40 Sensor de Direcção NRG 200	Software PC200W	Bateria 12 Ah Painel PV 10 W
			

Tabela 2.11 Rede de udometria – UDM

Sensor de Precipitação	Registador da Dados	Aplicação Informática
<p>Modelo: ARG100 Diâmetro colector: 254 mm Altura: 340 mm Tipo basculante Resolução: 0,2 mm</p>   	<p>Hobo Evente Memória: 8000 dados (EEPROM não volátil) Ritmo de aquisição: 0,5 s a 9 h Autonomia: 1 ano</p>	<p>Software BoxCar Pro 4.0</p>

Tabela 2.12 Rede de temperatura, humidade do ar e radiação solar – THRS


Sensor de Temperatura e Humidade	Aplicação Informática	12 Estações
<p>Modelo: SDL 5260 DataHog 2 Marca: Skye Instruments</p>	<p>SkyeLynx Standard</p>	
<p>Sensor de Radiação Modelo: SKS 1110/1 DataHog 2 Marca: Skye Instruments</p>	<p>Piranómetro de silício Gama: 0...5000w/m<sup>2</sup> Sensibilidade: 1mV-00W/m<sup>2</sup></p>	

Tabela 2.13 Rede de estações meteorológicas automáticas - REMA

Equipamento	EMA	Características
-------------	-----	-----------------







Unidade de aquisição de dados		Marca data Taker DT 500 e DT50. Cartão expansão memória 1MB, data Taker PROMC-1024P Caixa de protecção poliéster
Bateria	Recarregável 12 V/17 Ah	
Apoio solar	Painél fotovoltaico 20 Wp BP Solar, ref SX-20U	
Software de Gestão Integrada	Software de transfer data Taker, ref. DEX e Software avançado Delogger 4 Pro.Data Taker, ref. PRODLP-4CD	

Tabela 2.14 Características dos sensores da REMA

Tipo de sensor	Marca	Gama de medição	Precisão
Temperatura do ar (Ta)	Sensor combinado (T+HR) Thies ref. 1.1005.54.000 com	-30.....+ 70 °C	±0.1K
Humidade relativa do ar – (HR)	escudo de protecção radiação solar ref. 1.1025.55.000	0....100 %	±2%
Direcção do vento (DV)	Catavento, série Small. Thies, ref. 4.3124.30.01x	0....360 °	0.5 °
Velocidade do vento (VV)	Anemometro, série Small. Thies, ref. 4.3515.3 0.000	0,5... 50 m/s ±0.5 % ou ±0.5 m/s	
Sensor de radiação solar (RS tipo 1)	Piranómetro de silício, modelo SP LITE. Kipp & Zonen, ref. 0339900	100 µ V/Wm <sup>2</sup> Irradiância máxima 2000 W m <sup>2</sup>	
Sensor de radiação solar (RS tipo2)	Piranómetro de segunda classe, ISO, modelo CM3. Kipp & Zonen, ref. 0338900	305...2800 nm 10...35µ V/W m <sup>2</sup>	
Sensor de irradiância difusa com anel de sombreamento (RS tipo 3)	Piranómetro modelo CM11, (padrão sec. ISO). Kipp & Zonen, ref. 1305975 com anel de sombreamento, modelo CM121B. Kipp & Zonen, ref. 0346900	305...2800 nm 4...6µ V/W m <sup>2</sup>	
Sensor de pressão atmosférica (PA)	R.M. Young , ref. 61202V	600... 1100 hPa (mbar) ±0.3 hPa(mbar) a 20° C	
Sensor de precipitação (PR)	Udómetro. ENVir. Measurements, ref. ARG100/EC	0.2 mm por basculação	
Temperatura do solo (TS)	Skye Instruments, ref. SKTS 300	-30.....+ 100 °C 0.1 °C a 0°C	
Sistema para recolha manual	PDA Pocket PC 2003, HP, ref. IPAQH1940 com software EZLOG data Taker, ref. EZLOG		

As EMAS do LREC foram localizadas de forma a cobrir as zonas da ilha da Madeira e do Porto Santo com diferentes características de clima, relevo e vegetação e onde não existem estações meteorológicas do Instituto de Meteorologia ou outra instituição (Magro et al., 2006).

### 2.4.3 Concepção e aplicação de modelos de procedimentos de recolha e tratamento de dados

Devido ao grande número de equipamentos instalados nas redes anteriormente referidas, implementou-se um sistema fiável para garantir a qualidade dos dados recolhidos. Assim, o DHTE optou por implementar o sistema que mais se adaptasse ao modelo informático da base de dados em desenvolvimento: definição de um modelo funcional global e integrado no sistema informático, e definição de um modelo de instrução operacional para a recolha de dados. Na Figura 2.43 apresenta-se o *Diagrama de Procedimentos* relativo à recolha e tratamento de dados das redes do LREC.

### 2.4.4 Criação de uma base de dados na Internet

Foi iniciada a programação de uma base de dados que permitirá disponibilizar alguns dados na Internet (Figura 2.42). Prevemos que a primeira fase da aplicação – Dados dos Logger DataHog (temperatura, humidade relativa do ar, radiação solar, precipitação e vento) possa estar concluída até ao final de 2007.

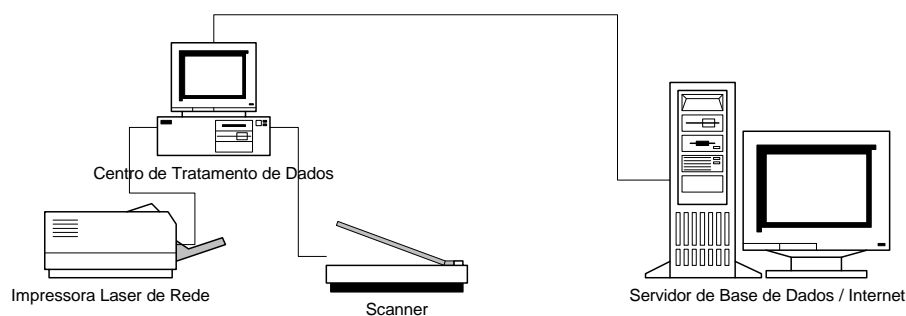


Figura 2.42 Diagrama de Hardware – Base de Dados (Fonte: C.Neves)

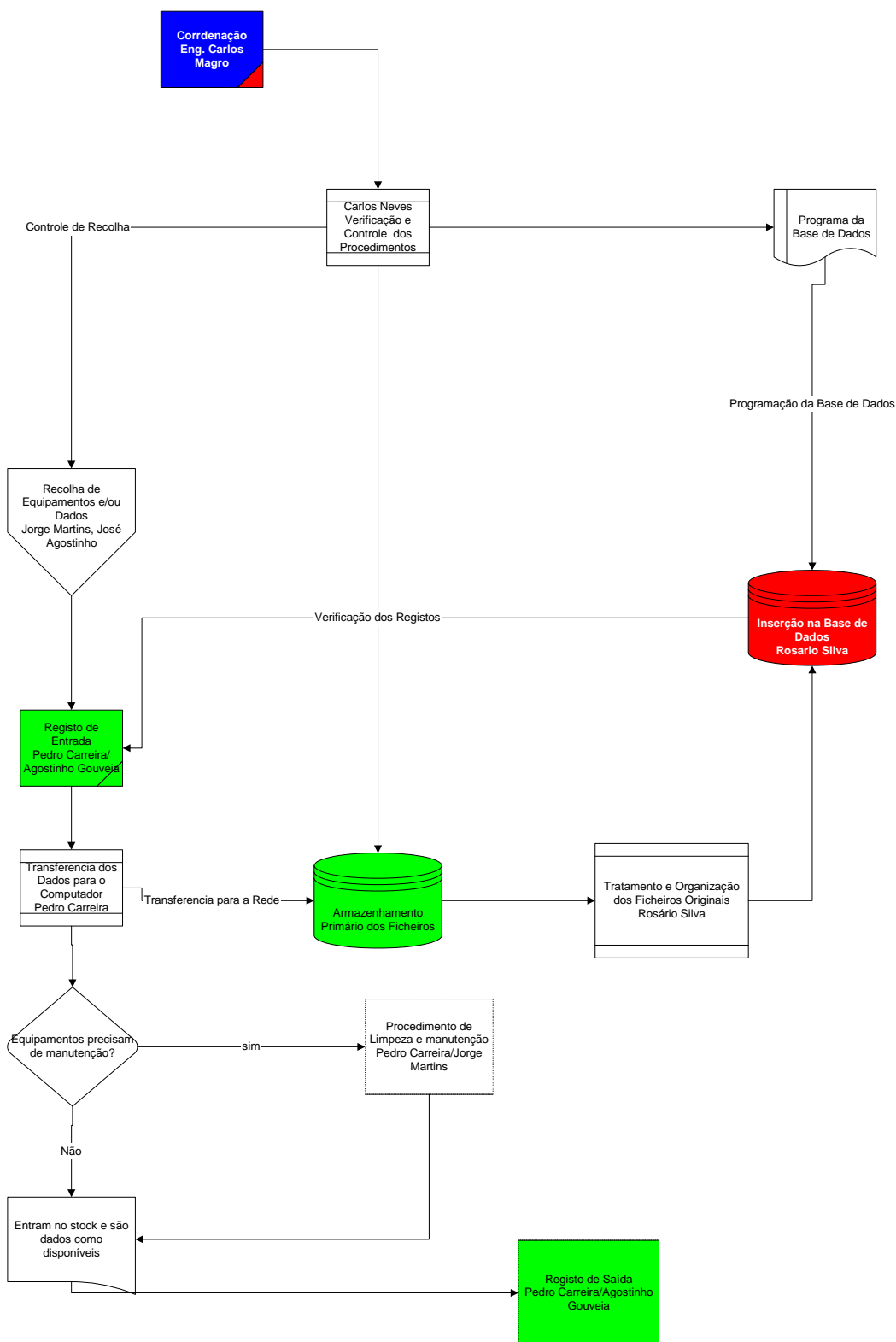


Figura 2.43 Diagrama de Procedimentos - Recolha e Tratamento de dados (Fonte: C.Neves)

## CAPITULO 3

### BASE DE DADOS DA TESE

---

### 3. BASE DE DADOS DA TESE

#### 3.1 BASES DE DADOS METEOROLÓGICOS DISPONÍVEIS NO ARQUIPÉLAGO DA MADEIRA

A base de dados necessária para a elaboração da tese está condicionada ao próprio título da mesma: “Optimização de Sistemas Híbridos Fotovoltaicos-Eólicos em zonas Insulares de Diversidade Climática”, tendo em conta que o estudo reporta-se ao arquipélago da Madeira. Para o desenho dos sistemas fotovoltaicos são necessárias as variáveis meteorológicas, radiação solar e temperatura do ar, e para o cálculo dos sistemas eólicos é necessário a velocidade do vento (*Esteves, Teresa, 2004*). Portanto, é imprescindível a utilização de uma base de dados que contenha simultaneamente radiação solar, temperatura do ar e velocidade do vento de vários locais do arquipélago, e de um período de tempo representativo. No caso concreto do vento, para se fazer uma correcta caracterização do escoamento atmosférico num dado local, devem-se dispor de pelo menos 3 anos de dados, por forma a se reduzir as incertezas associadas à variabilidade inter-anual do escoamento atmosférico, como é referido em diversa literatura da especialidade (*Silva, M., 1996*) e (*Castro, 2004*).

Por outro lado, quanto maior for o número de pontos geográficos com dados de radiação, temperatura e vento, e quanto maior for o número de anos, mais fiáveis serão os resultados. Também interessa que a escala temporal de análise dos dados seja o mais curta possível, sendo os valores horários preferíveis aos valores diários. Na região, há várias entidades que registam variáveis meteorológicas, nomeadamente a Direcção Regional do Ambiente, a Direcção Regional de Agricultura, a Empresa de Electricidade da Madeira, a IGA-Investimentos e Gestão de Água, a Universidade da Madeira, o Instituto de Meteorologia, o Laboratório Regional de Engenharia Civil, entre outros, mas só estas duas últimas entidades, IM e LREC, dispõem de registos contínuos de radiação solar, temperatura do ar e velocidade do vento. Foi escolhida para este estudo a base do IM que é a base que apresenta o maior período de tempo de dados fiáveis.

##### 3.1.1 Base de dados do LREC

O Departamento de Hidráulica e Tecnologias Energéticas do LREC dispõe de várias redes meteorológicas específicas, já referidas no capítulo II, cujo objectivo é criar uma base de

dados regional, apropriada para projectos multidisciplinares de engenharia, nomeadamente, energias renováveis, ecologia, entre outros. As redes para o efeito são as seguintes: rede de anemometria, rede de udometria, rede de temperatura e humidade relativa do ar e radiação solar, e ainda uma rede de estações meteorológicas automáticas, designadas respectivamente por ANEM, UDM, THRS e REMA. Esta última monitoriza simultaneamente radiação solar, temperatura do ar, e velocidade do vento, entre outras grandezas. A Tabela 3.1 apresenta a localização geográfica das estações meteorológicas automáticas do LREC.

Tabela 3.1 Rede de estações meteorológicas automáticas do LREC

Local	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período de dados	Concelho
LREC – São Martinho	32° 39' N	16° 56' W	250	Desde 01/06/05	Funchal
Pico Verde	32° 46' N	17° 10' W	1020	Desde 01/09/05	Calheta
Santa do Porto Moniz	32° 50' N	17° 11' W	675	Desde 01/10/05	Porto Moniz
Bica da Cana/ Paúl da Serra	32° 45' N	17° 03' W	1600	Desde 13/09/05	S.Vicente
Encumeada	32° 45' N	17° 01' W	1017	Desde 01/11/05	Ribeira Brava
Poiso/Areeiro	32° 42' N	16° 53' W	1200	Desde 01/09/06	Funchal
Deserta Grande	32° 29' N	16° 30' W	50	Desde 25/10/05 até 30/06/06	Funchal

As estações indicadas na Tabela 3.1 foram instaladas em datas diferentes, pelo que não entraram em funcionamento ao mesmo tempo. A estação do LREC em São Martinho e as estações do Pico Verde na Calheta, da Santa no Porto Moniz, da Bica da Cana no Paúl da Serra, da Encumeada em S.Vicente e da Deserta Grande, entraram em funcionamento ao longo do ano de 2005. A estação do Poiso/Areeiro só começou a funcionar em Setembro de 2006. A Tabela 3.2 mostra a localização e o período de dados das estações do LREC e a Tabela 3.3 mostra as variáveis meteorológicas registadas nas referidas estações.

Tabela 3.2 Estações do LREC em 2006

Local	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período de dados	Concelho
Pico Verde	32° 46' N	17° 10' W	1020	2006	Calheta
Santa - P.Moniz	32° 50' N	17° 11' W	675	2006	Porto Moniz
Encumeada	32° 45' N	17° 01' W	1017	2006	S.Vicente
Santo da Serra *	32° 42' N	18° 49' W	795	2005	S. Cruz

\* Esta estação do LREC não é automática.

### 3.1.2 Base de dados do Instituto de Meteorologia

O Instituto de Meteorologia - Direcção Regional da Madeira dispõe de uma rede de estações localizadas nas ilhas da Madeira e do Porto Santo, que monitorizam diversas variáveis meteorológicas entre as quais a radiação solar, a temperatura do ar e a velocidade do vento. Na Tabela 3.4 e na Figura 3.1 mostra-se a localização das referidas estações meteorológicas no arquipélago.

Tabela 3.3 Variáveis meteorológicas registadas na REMA do LREC

<b>T inst</b>	°C	Temperatura instantânea
<b>Tmax</b>	°C	Temperatura máxima diária
<b>Tmed</b>	°C	Temperatura média diária
<b>Tmin</b>	°C	Temperatura mínima diária
<b>Hmax</b>	%	Humidade máxima diária
<b>Hmed</b>	%	Humidade média horária
<b>Hmin</b>	%	Humidade mínima horária
<b>ddpred</b>		Direcção predominante do vento (00-24h)
<b>dfmed</b>	m/s	Velocidade média do vento (00-24h)
<b>ddmax</b>	Grau	Direcção correspondente à velocidade máxima instantânea do vento
<b>ffmax</b>	m/s	Velocidade máxima instantânea do vento (00-24h)
<b>RadGT</b>	MJ/m <sup>2</sup>	<b>Total de Radiação Global (00-24h)</b>
<b>RadX</b>	W/m <sup>2</sup>	Máximo de Radiação (00-24h)
<b>PrecT24</b>	mm	Total de Precipitação (00-24 h)
<b>Trelmax</b>	°C	Temperatura da relva máxima
<b>Trelmed</b>	°C	Temperatura da relva média
<b>Trelmin</b>	°C	Temperatura da relva mínima
<b>Patmmax</b>	hPa	Pressão atmosférica máxima
<b>Patmmed</b>	hPa	Pressão atmosférica média
<b>Patmmin</b>	hPa	Pressão atmosférica mínima

Tabela 3.4 Estações do Instituto de Meteorologia no arquipélago da Madeira

Local	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Funchal	32° 38' 46"	16° 53' 27"	58
Porto Santo	33° 04' 23"	16° 20' 50"	82
Areiro	32° 43' 15"	16° 54' 49"	1510
Lugar de Baixo	32° 40' 47"	17° 05' 28"	48
São Jorge	32° 49' 54"	16° 54' 24"	271
Ponta do Pargo	32° 48' 44"	16° 53' 27"	312

Para a realização do nosso estudo, o Instituto de Meteorologia, através da Direcção Regional da Madeira, forneceu-nos dados das estações já mencionadas, relativos a vários períodos do intervalo 1996-2005 e com escala temporal de análise de registo horário e diário. Com sequências temporais horárias foram fornecidos dados do período 2002-2005 de radiação solar global (Total de Radiação Global, Radiação Global máxima e Radiação Global mínima) de todas as estações. Da estação do Funchal, foram fornecidos dados de radiação solar difusa e radiação solar directa. A Tabela 3.5 indica o tipo de dados de radiação fornecida pelo Instituto de Meteorologia. Com escala temporal de análise diária foram fornecidos dados das variáveis que aparecem na Tabela 3.6, do período 1996-2005, relativos às estações do Funchal e Porto Santo, e do período 2002-2005 do resto das estações.

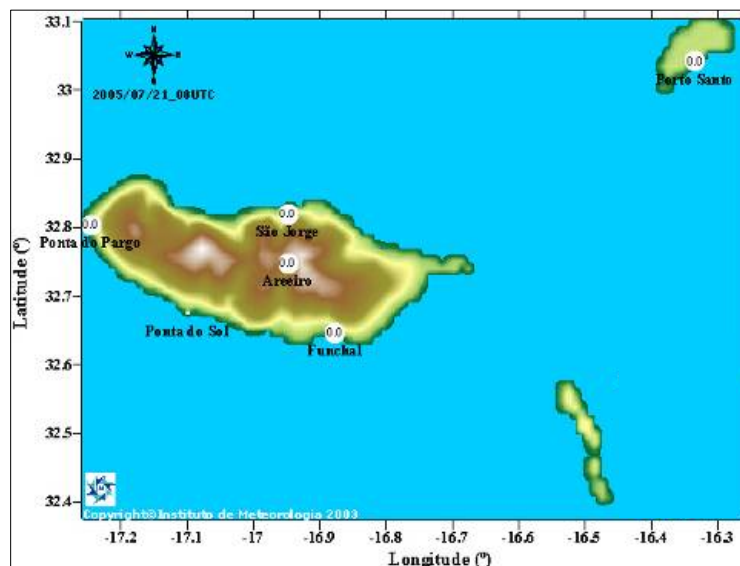


Figura 3.1 Localização das estações meteorológicas do IM no arquipélago de Madeira

Tabela 3.5 Variáveis de radiação solar, período 2002-2005, estações do IM

RadG	(kJ/m <sup>2</sup> )	Total Radiação Global
RadX	(W/m <sup>2</sup> )	Radiação Global máxima
RadN	(W/m <sup>2</sup> )	Radiação Global mínima
RadF	(kJ/m <sup>2</sup> )	Total Radiação Difusa
RadFX	(W/m <sup>2</sup> )	Radiação Difusa máxima
RadFN	(W/m <sup>2</sup> )	Radiação Difusa mínima
RadD	(kJ/m <sup>2</sup> )	Total Radiação Directa
RadDX	(W/m <sup>2</sup> )	Radiação Directa máxima
RadDN	(W/m <sup>2</sup> )	Radiação Directa mínima

De referir que as três primeiras variáveis são registadas em todas as estações do Instituto de Meteorologia e as seis últimas apenas na estação do Funchal.

### 3.1.3 Metodologia da utilização da base de dados

No início do presente estudo dispúnhamos apenas de dados de 2002 das estações do Instituto de Meteorologia localizadas no arquipélago. Entretanto, e no âmbito do projecto PAUER anteriormente referido, projectámos e instalámos uma rede de estações meteorológicas automáticas-REMA. Como inicialmente os dados que dispúnhamos do IM eram insuficientes, foi necessário aguardar por um número mínimo de anos de dados, que entretanto eram recolhidos. Por razões de prazo legal para a finalização da tese, definimos como limite para o tratamento de dados, o final do ano 2005. Ao fim desse período já dispúnhamos de 4 anos de informação climática, o que permitiu fazer uma comparação coerente entre todas as estações. A Figura 3.2 indica a localização das estações meteorológicas do LREC e IM localizadas na ilha da Madeira.

Tabela 3.6 Valores diários das variáveis meteorológicas registadas nas estações do IM

Tmed	(°C)	Temperatura média (média de 24 valores horários 00-24h)
Tmax	(°C)	Temperatura máxima (00-24 h)
Tmin	(°C)	Temperatura mínima (00-24 h)
Hmed	(%)	Humidade média (00-24 h)
Hmax	(%)	Humidade máxima (00-24 h)
Hmin	(%)	Humidade mínima (00-24 h)
RadGT	(kJ/m <sup>2</sup> )	Total da Radiação Global (00-24h)
RadX	(W/m <sup>2</sup> )	Máximo de Radiação (00-24h)
ddpred		Rumo predominante do vento (00-24h)
dfmed	(m/s)	Velocidade média do vento (00-24h)
ddmax	Grau	Rumo correspondente à velocidade máxima instantânea do vento (00-24h)
ffmax	(m/s)	Velocidade máxima instantânea do vento (00-24h)
PrecT24	(mm)	Total de Precipitação (00-24 h)
T05min	(°C)	Temp. mínima a 5 cm acima do solo ("mínima na relva" 00-24h)
Tmed09	(°C)	Temperatura média (09-09 h)
Tmax09	(°C)	Temperatura máxima (09-09 h)
Tmin09	(°C)	Temperatura mínima (09-09 h)
PrecT09	(mm)	Total de Precipitação (09-09 h)

Os valores das 09-09h são incluídos para eventuais comparações com estações convencionais, em que as observações se efectuam às 09h.



Figura 3.2 Estações do LREC e IM localizadas na ilha da Madeira (Fonte: MONIZZI)

### 3.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DOS EQUIPAMENTOS DAS ESTAÇÕES

Nas Tabelas 2.13 e 2.14 do Capítulo II estão indicadas as características principais do equipamento da Rede de Estações Automáticas - REMA do LREC, nomeadamente, as características da unidade de aquisição de dados e respectivo software bem como as características dos sensores de medição das grandezas meteorológicas.

## CAPITULO 4

### TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

---

## 4. TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

### 4.1 DIAS CARACTERÍSTICOS DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

#### 4.1.1 Base de dados de radiação solar

Para o cálculo da produção fotovoltaica de um dado local pode utilizar-se apenas, como dado de radiação solar os dias característicos representativos de cada mês. No nosso estudo, para a obtenção dos dias característicos de radiação solar global e de temperatura, utilizaremos a base de dados diários das estações do Instituto de Meteorologia, por ser a única que dispõe simultaneamente de dados de radiação solar, temperatura do ar e velocidade do vento no período 2002-2005. Na Tabela 3.6 do Capítulo III indicaram-se as variáveis meteorológicas que são registadas diariamente nas referidas estações. Neste capítulo só utilizaremos a variável RadGT - Total de Radiação Global Diária, expressa em  $\text{kJ/m}^2\cdot\text{dia}$ . A Tabela 4.1 mostra para cada uma das estações, os dias com lacunas de dados de cada mês, referentes ao período de quatro anos. Pode-se verificar que existem lacunas de dados no Porto Santo nesse período, faltando os dados de Abril de 2002 até Julho de 2003.

Tabela 4.1 Dias com lacunas, estações do IM (2002-2005)

	Total de dias	Funchal	Areiro	São Jorge	Lugar de Baixo	Ponta do Pargo	Porto Santo
<b>Janeiro</b>	124	0	33	31	31	32	43
<b>Fevereiro</b>	113	0	15	10	15	14	40
<b>Março</b>	124	1	1	2	1	0	60
<b>Abril</b>	120	3	8	2	2	1	61
<b>Mai</b>	124	0	0	0	5	0	62
<b>Junho</b>	120	1	0	0	0	0	60
<b>Julho</b>	124	0	6	21	1	0	62
<b>Agosto</b>	124	0	0	0	0	0	52
<b>Setembro</b>	120	2	1	0	0	0	31
<b>Outubro</b>	124	0	17	7	4	6	32
<b>Novembro</b>	120	1	2	0	0	4	30
<b>Dezembro</b>	124	0	2	6	0	7	31
<b>2002-2005</b>	<b>1461</b>	<b>8</b>	<b>85</b>	<b>79</b>	<b>59</b>	<b>64</b>	<b>564</b>

### 4.1.2 Radiação solar médias diárias mensais e anual

Na Tabela 4.2 mostra-se o valor da irradiação solar global diária média mensal e média anual em Wh/m<sup>2</sup>.dia para cada uma das estações analisadas do IM, e para o total dos dias com dados relativos ao período de 2002 a 2005. Estes mesmos valores aparecem representados na Figura 4.1.

Tabela 4.2 Irradiação solar global diária média mensal e média anual em Wh/m<sup>2</sup>.dia -estações do IM - período 2002-2005

	Areiro	Funchal	Lugar de Baixo	Ponta do Pargo	São Jorge	Porto Santo
<b>Janeiro</b>	3146	2846	2775	2754	2392	2734
<b>Fevereiro</b>	3194	3419	3474	3469	2982	3632
<b>Março</b>	4495	4643	4628	4428	4041	5019
<b>Abril</b>	5130	4683	5044	5577	4893	6155
<b>Mai</b>	6637	5691	6144	6765	5553	7306
<b>Junho</b>	7470	5601	6136	7285	6175	7095
<b>Julho</b>	8023	5614	6024	7232	5770	7075
<b>Agosto</b>	6402	5496	5960	6496	6016	6545
<b>Setembro</b>	5232	5043	5217	5155	4891	5534
<b>Outubro</b>	3790	3691	3879	3862	3617	4056
<b>Novembro</b>	2517	2865	2922	2753	2339	3123
<b>Dezembro</b>	2305	2481	2568	2547	1972	2511
<b>2002-2005</b>	<b>4873</b>	<b>4345</b>	<b>4570</b>	<b>4868</b>	<b>4226</b>	<b>5072</b>

Analisando os valores da Tabela 4.2 e do gráfico da Figura 4.1 conclui-se o seguinte:

- Os valores médios anuais mais altos registaram-se no Porto Santo à volta de 5000 Wh/m<sup>2</sup>.dia, a Ponta do Pargo e o Areiro, ambos com cerca de 4900 Wh/m<sup>2</sup>.dia, a seguir o Lugar de Baixo com 4600 Wh/m<sup>2</sup>.dia, depois o Funchal com cerca de 4400 Wh/m<sup>2</sup>.dia e, por fim, S. Jorge com cerca de 4300 Wh/m<sup>2</sup>.dia.
- Os valores registados na estação do Porto Santo mostram que nesta ilha ocorre mais radiação solar ao longo do ano que na ilha de Madeira, excepto nos meses de Junho e Julho, em que os quantitativos nas estações da Ponta do Pargo e Areiro são superiores.

- c) As diferenças maiores de radiação solar mensal entre as seis estações registam-se de Maio a Agosto. Nestes meses é quando mais se diferenciam Porto Santo, Ponta do Pargo e Areeiro das outras três estações.
- d) Nos meses de Setembro e Outubro a radiação solar é muito semelhante em todas as estações.
- e) O valor máximo de radiação solar é verificado no Areeiro no mês de Julho.
- f) No Funchal e Lugar de Baixo, a radiação solar praticamente permanece constante nos meses de Maio a Agosto. Nesse período, o Funchal é a estação que recebe menos radiação solar, sem dúvida devido ao fenómeno do “capacete”.
- g) O Funchal é a estação que mantém um nível de radiação mais uniforme ao longo do ano.

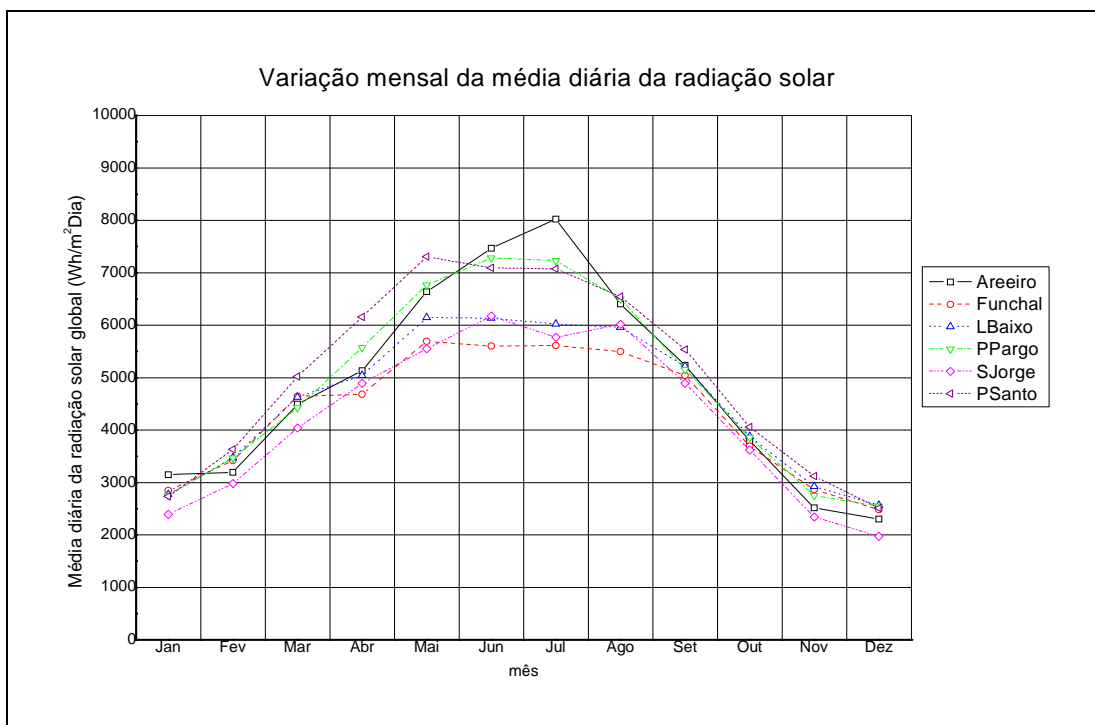


Figura 4.1 Irradiação solar global diária média mensal em Wh/m<sup>2</sup>.dia para cada uma das estações analisadas no período 2002-2005

O efeito do “capacete” consiste na formação de uma cobertura nebulosa parcial ou total, que se estabelece em redor da ilha da Madeira, a partir do fim da manhã, consequência do aquecimento das superfícies terrestres e afluência a terra de ar marítimo. É mais frequente no início do Verão, pese embora ocorra nas outras estações do ano (Ribeiro, 1985).

### 4.1.3 Dias característicos de radiação solar global de cada mês

Como se referiu anteriormente para o cálculo da produção fotovoltaica pode-se utilizar apenas, como dado de radiação solar os dias característicos representativos de cada mês. No que diz respeito à energia solar disponível, um dia característico de um dado mês, será um dia com uma duração igual à média do mês (horas máximas de sol), cuja irradiação solar diária seja igual à média do mês, e cuja distribuição de irradiâncias solares ao longo do dia coincida também com a distribuição média do mês. Vários estudos têm demonstrado que a produção fotovoltaica mensal, calculada com base na utilização do dia característico de radiação de cada mês, não difere significativamente da calculada com os dados de radiação minuto a minuto e ao longo de todo o mês.

Por outro lado, em caso de se dispor apenas do valor diário de radiação do dia característico, como é o caso dos locais de estudo, podemos obter uma aproximação à distribuição da irradiância solar, mediante a utilização de expressões matemáticas apresentadas em diversa bibliografia. No nosso caso aplicamos uma distribuição sinusoidal que é a utilizada no método Heliosat-2 (*Rigolier et al. 2000*), para modelar a irradiância em modelo de céu claro. Em primeiro lugar é necessário fixar a duração do dia característico de cada mês, e determinar para o dia médio do mês o valor da radiação extraterrestre. A duração do dia é o tempo que vai desde o amanhecer (altura solar  $0^\circ$ ) até ao anoitecer (altura solar  $0^\circ$ ).

Na Tabela 4.3 apresenta-se os dias médios de cada mês. Na mesma também se indica o número do dia correspondente ao dia juliano (1 a 365), bem como a declinação solar do dia.

Tabela 4.3 Dia médio de cada mês

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>dia do mês</b>	17	15	15	16	16	12	18	17	16	16	15	11
<b>dia juliano (n)</b>	17	46	76	106	136	163	199	229	259	289	319	345
<b>declinação solar <math>\delta</math> (<math>^\circ</math>)</b>	-20.917	-13.289	-2.016	9.783	19.031	23.153	21.007	13.122	1.815	-9.966	-19.148	-23.120

Uma vez fixado o dia do ano, determina-se a duração do dia que depende da latitude do lugar. No nosso caso, dadas as pequenas diferenças de latitude entre as estações, as diferenças na duração do dia entre elas também é pequena, pelo que se opta por considerar um valor de

latitude média de  $32,75^\circ$  para todas elas. A distribuição da irradiância solar em cada dia característico pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$I_w = A \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{w}{w_s}\right) \quad \text{com } -w_s \leq w \leq w_s \quad (4.1)$$

$$\text{e } A = \frac{G_d \pi^2}{48 \cdot w_s} \quad (4.2)$$

Sendo:

$I_w$  - irradiância solar num dado instante  $W/m^2$

$A$  - factor de escala da curva sinusoidal

$w$  - ângulo horário nesse instante em radianos

$w_s$  - ângulo horário ao anoitecer ( $-w_s$  é o ângulo horário ao amanhecer), em radianos, correspondente ao dia característico do mês à latitude de referência  $32,75^\circ$

$G_d$  - valor da irradiação global média diária mensal, em  $Wh/m^2 \cdot dia$ , de cada mês do ano e de cada estação, obtido da Tabela 4.2.

$w_s$  é calculado pela seguinte expressão:

$$w_s = \arccos(-\tan L \tan \delta) \quad (4.3)$$

Sendo:  $L$  – Latitude

$\delta$  - Declinação solar do dia característico

No nosso estudo consideramos  $32,75^\circ$  para todas as estações. O valor de  $A$  deve ser tal que a integração das irradiâncias  $I_w$  ao longo do dia coincida com o valor  $G_d$ . As Figuras 4.2 a 4.13 mostram a distribuição sinusoidal da irradiância solar ao longo do dia para cada um dos meses do ano, nas seis estações do IM. Finalmente, na Figura 4.14 compara-se, a título de exemplo, a distribuição sinusoidal do dia característico do mês de Abril, no Funchal, com a distribuição dos valores médios horários de radiação solar desse mesmo mês, obtidos da base de dados fornecida pelo IM. Verifica-se que os valores se ajustam relativamente bem.

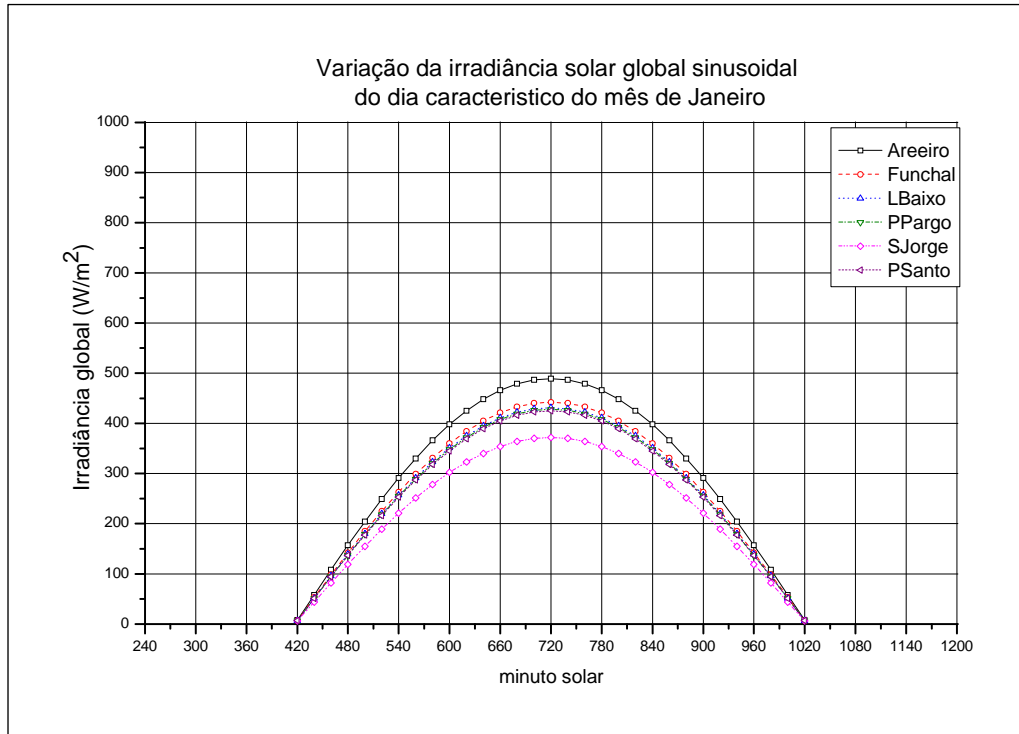


Figura 4.2 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Janeiro

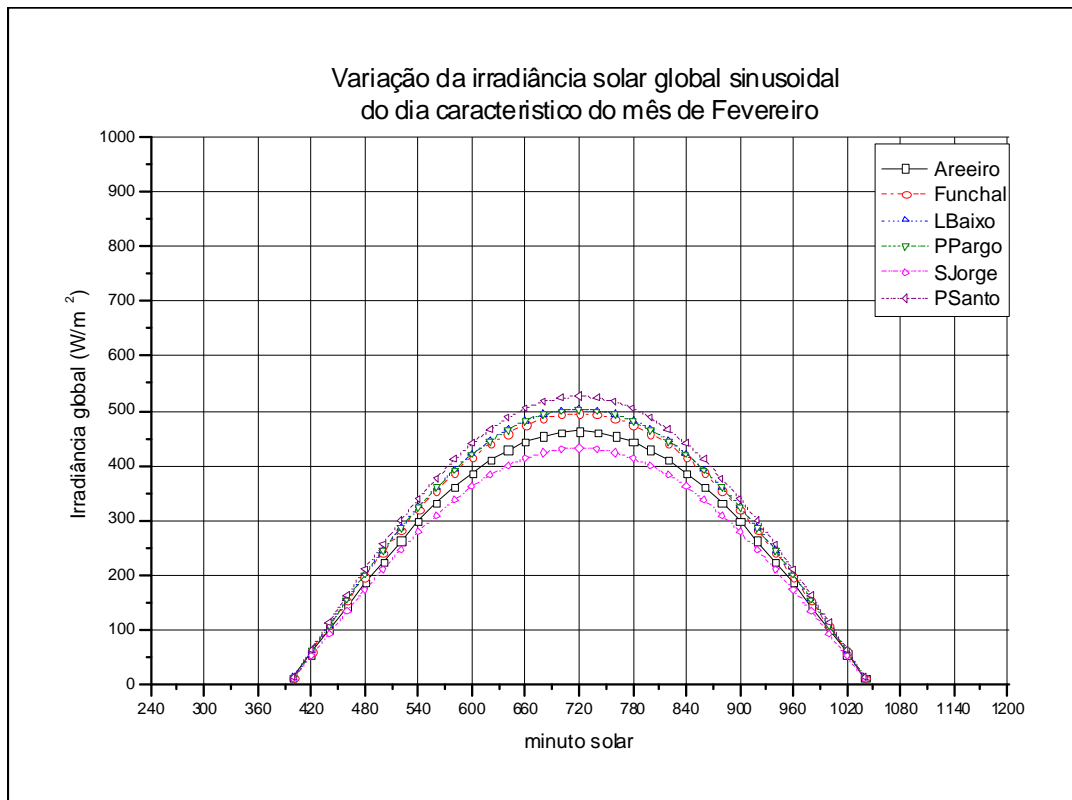


Figura 4.3 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Fevereiro

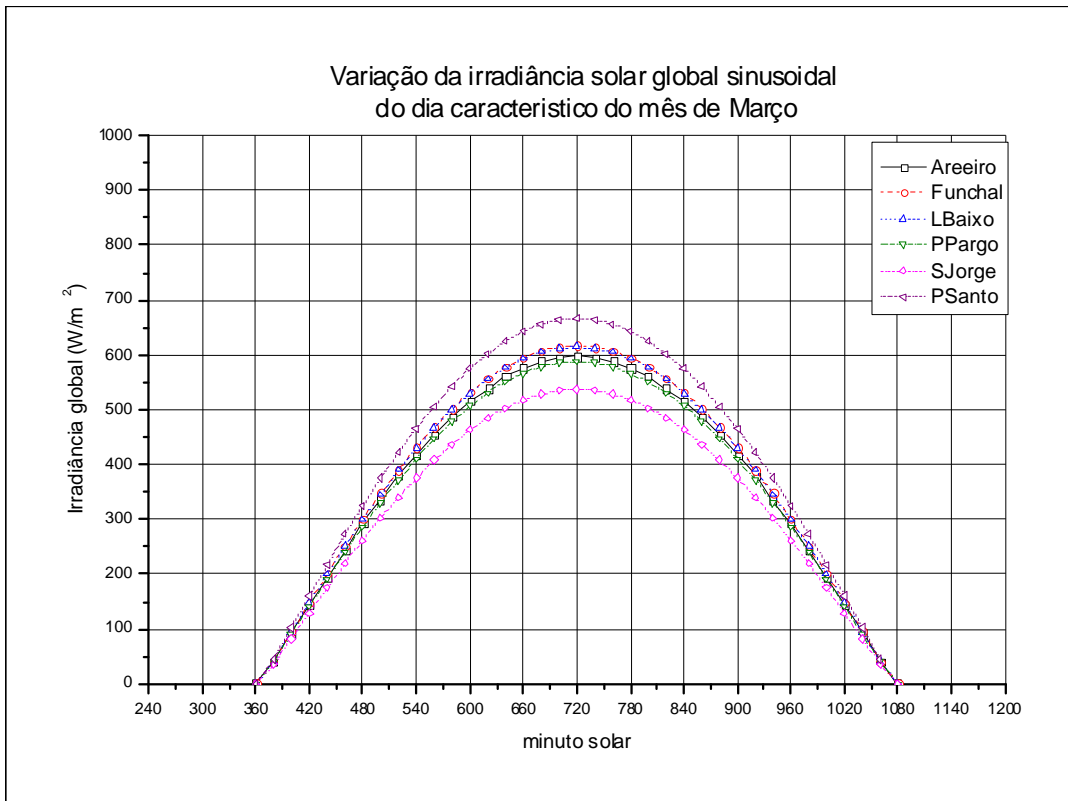


Figura 4.4 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Março

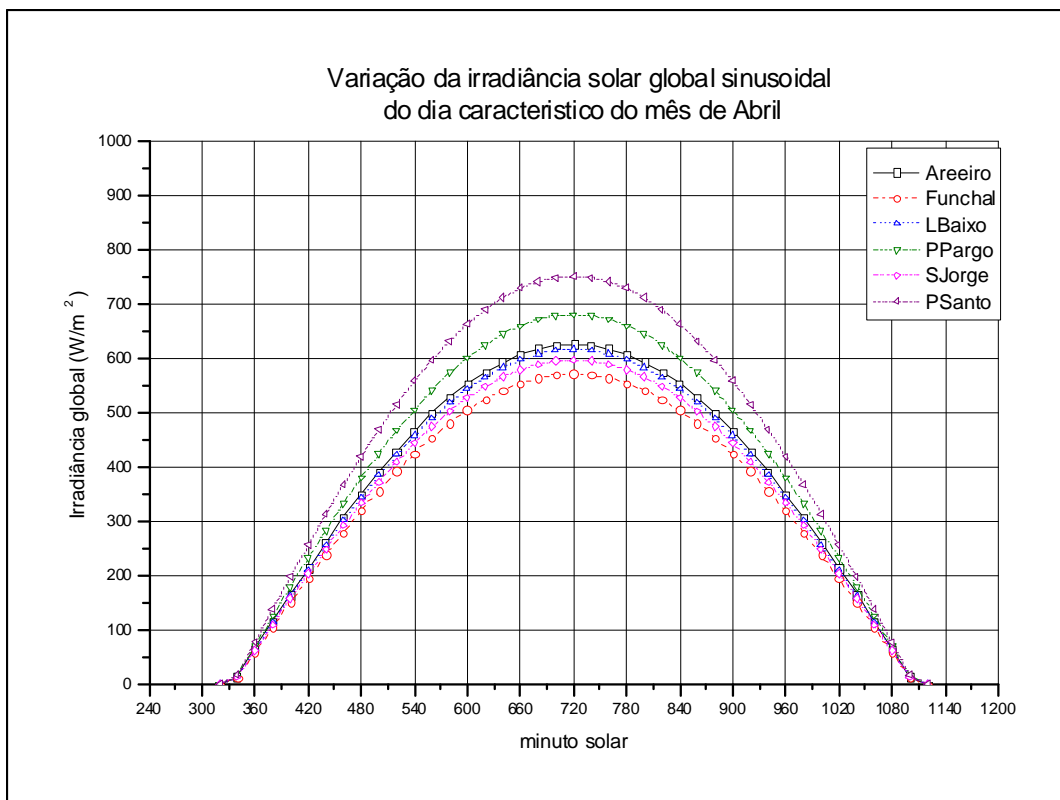


Figura 4.5 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Abril

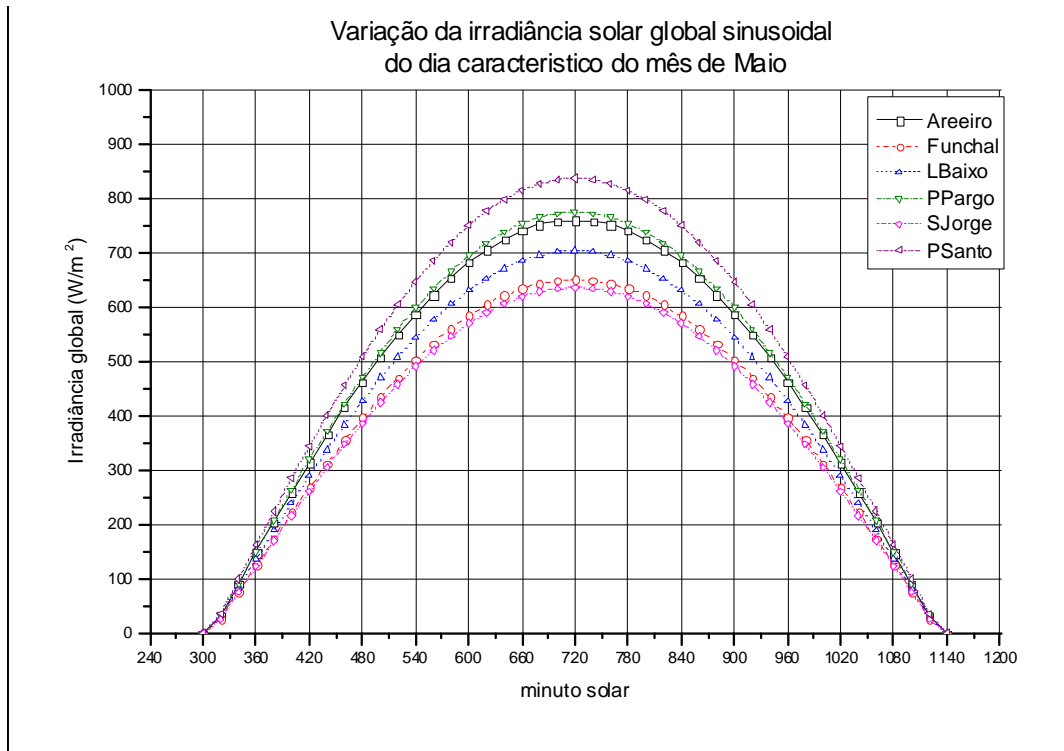


Figura 4.6 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Maio

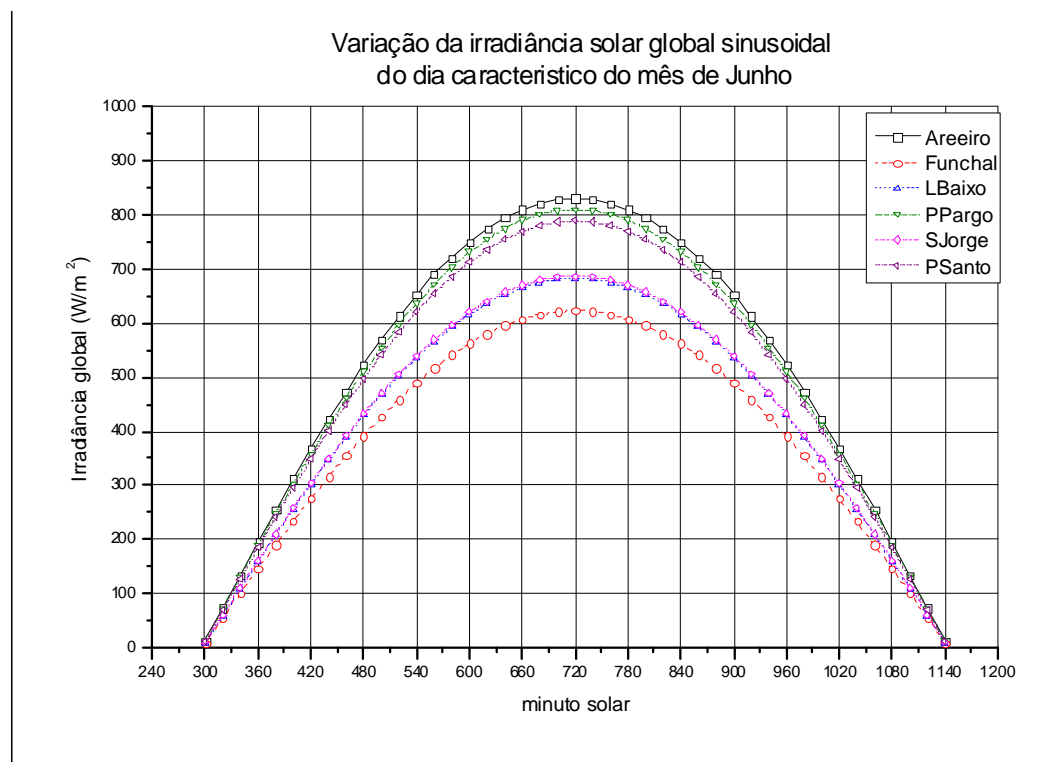


Figura 4.7 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Junho

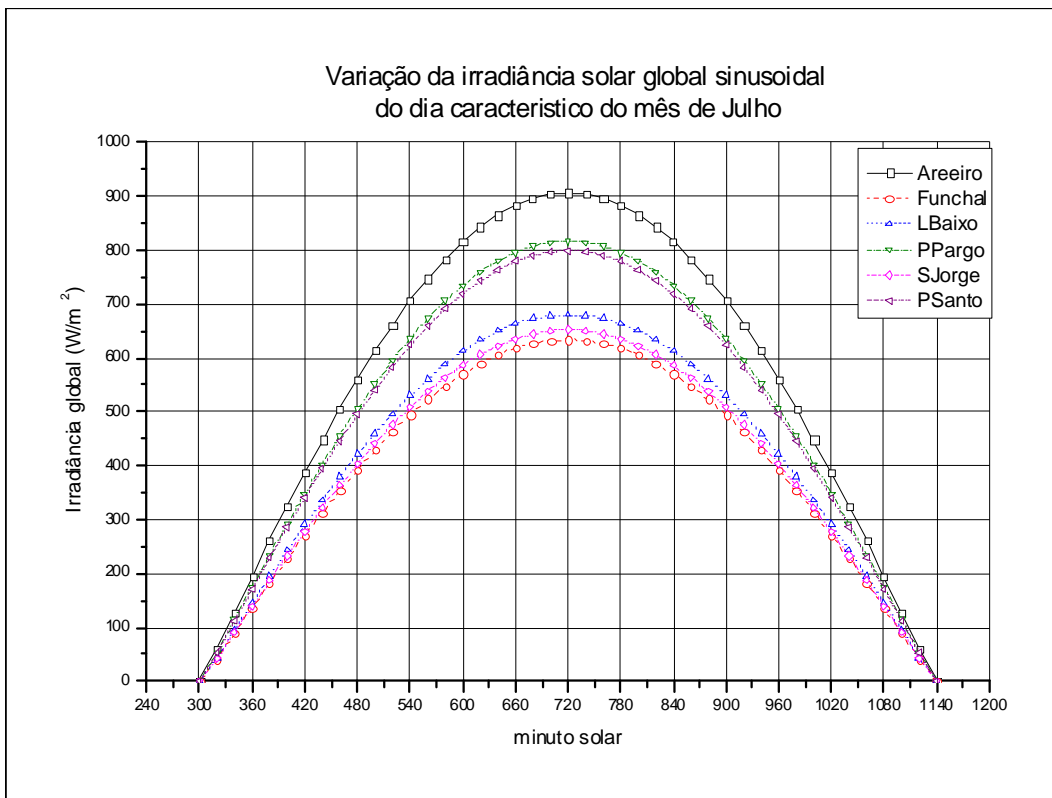


Figura 4.8 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Julho

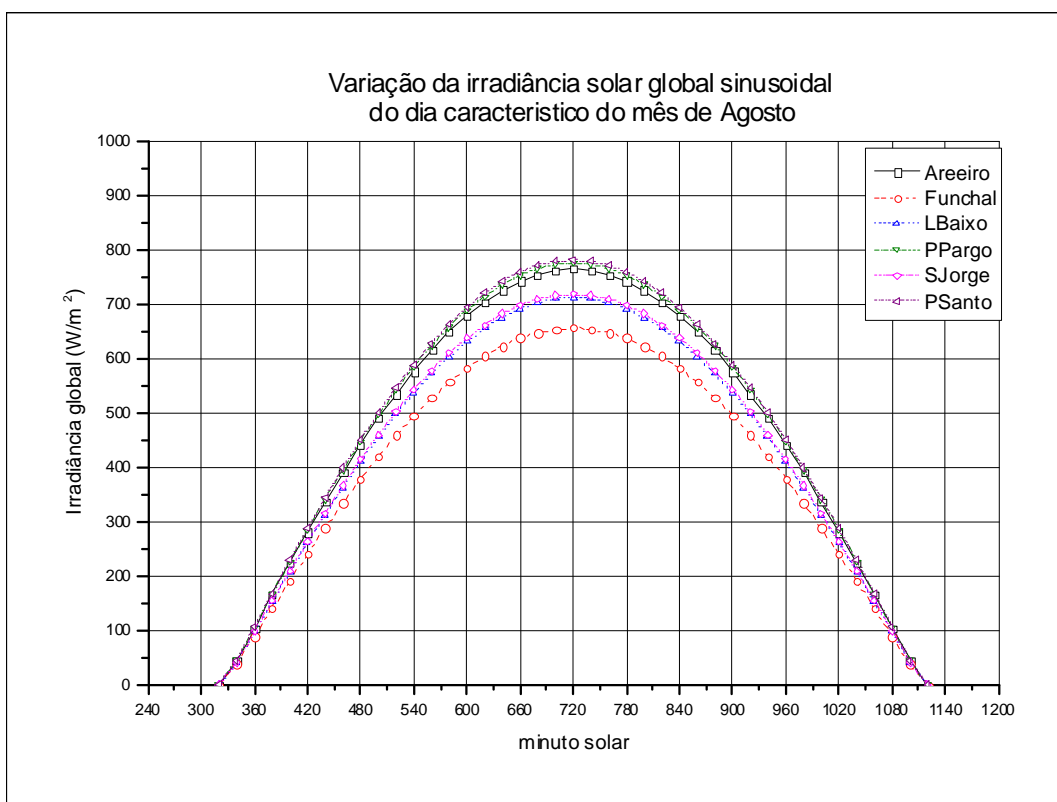


Figura 4.9 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Agosto

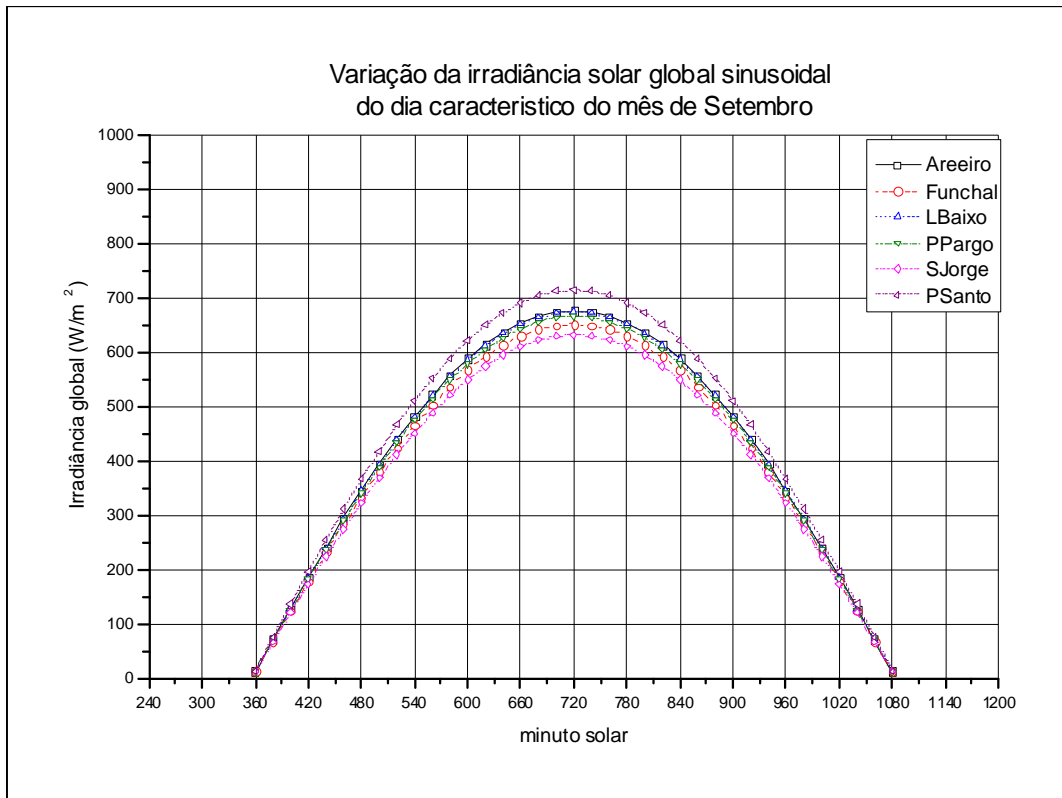


Figura 4.10 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Setembro

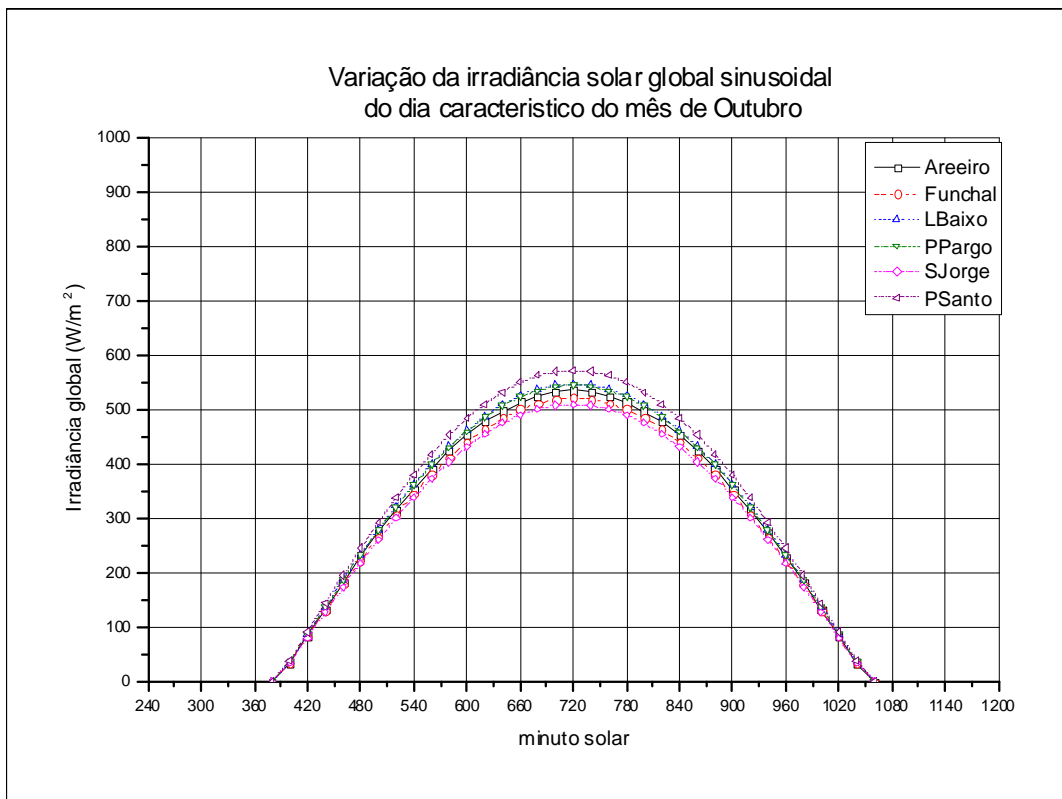


Figura 4.11 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Outubro

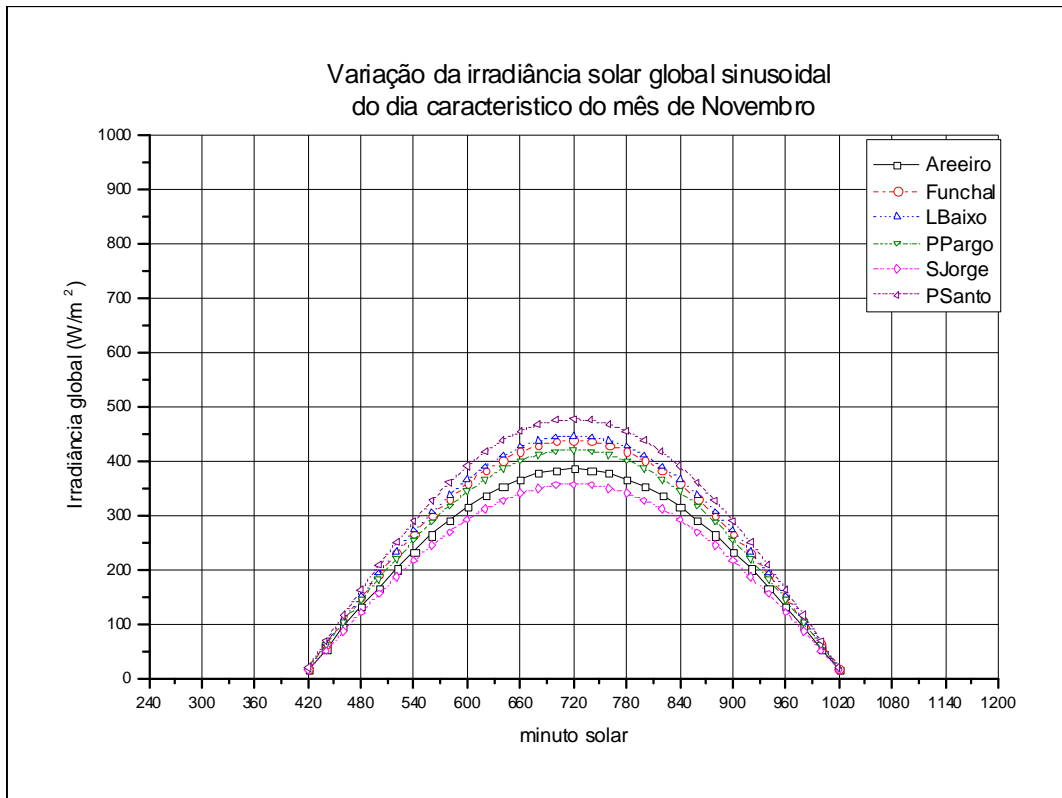


Figura 4.12 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Novembro

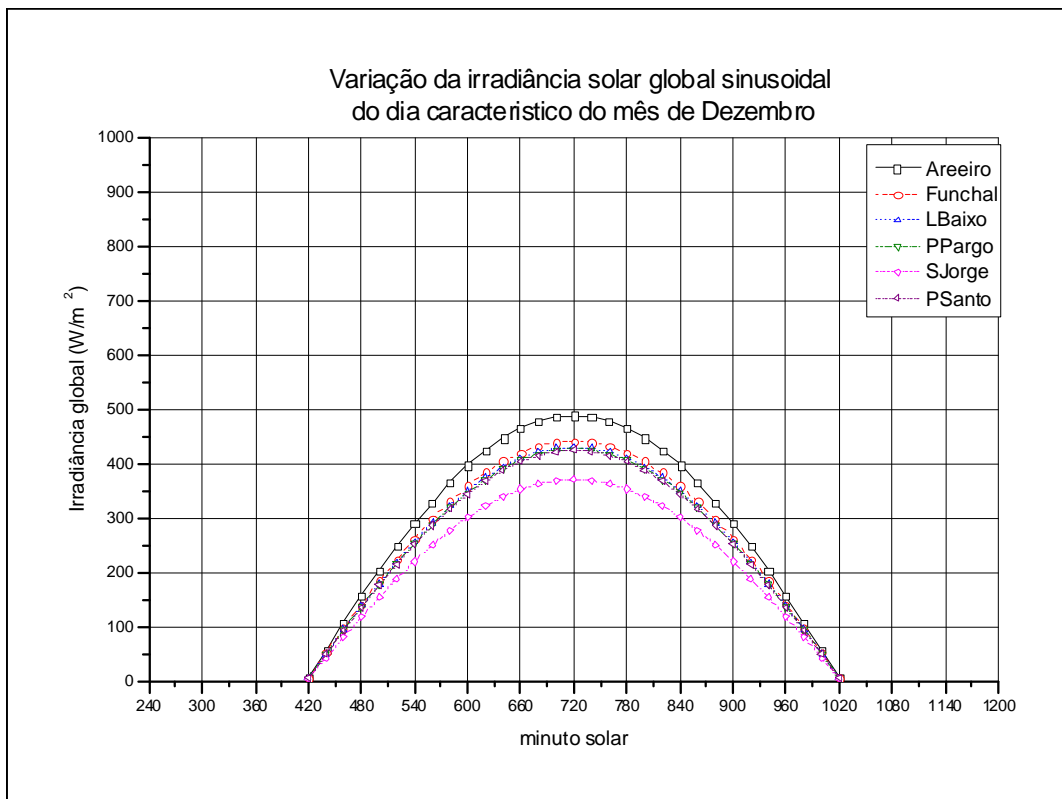


Figura 4.13 Distribuição da irradiância solar ao longo do dia característico do mês de Dezembro

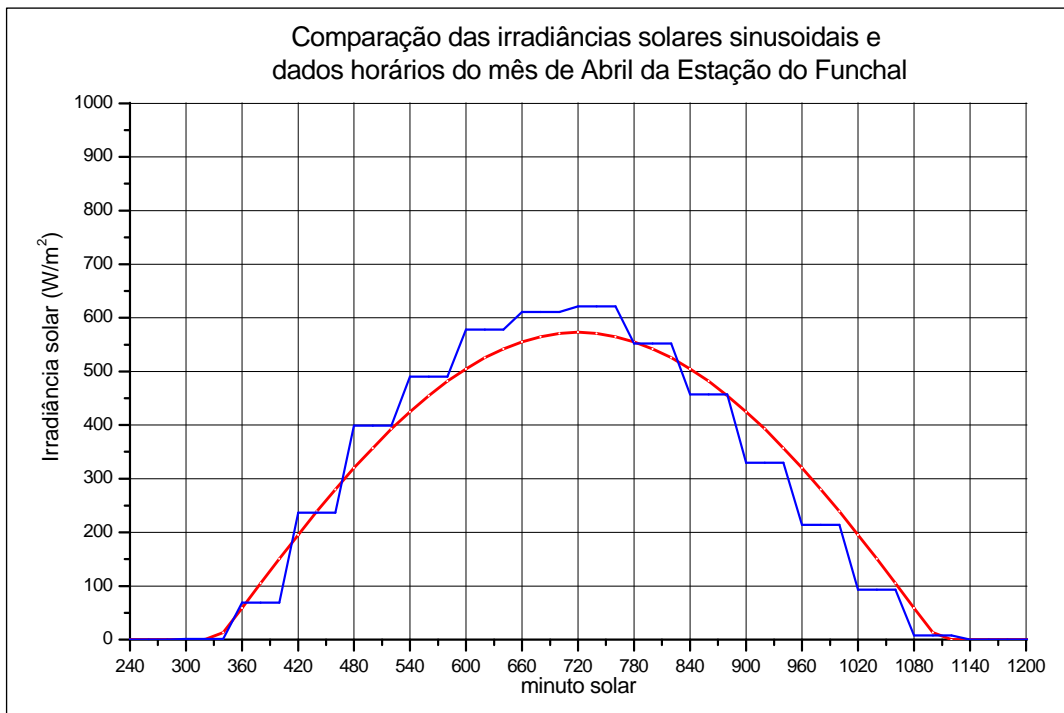


Figura 4.14 Comparação no Funchal da distribuição sinusoidal do dia característico do mês de Abril, com a distribuição dos valores médios horários de radiação solar desse mesmo mês indicados na Tabela 4.2.

## 4.2 DIAS CARACTERÍSTICOS DE TEMPERATURA

### 4.2.1 Base de dados de temperatura

Como é sabido, para o cálculo da produção energética solar térmica ou fotovoltaica em qualquer local, é necessário o conhecimento da radiação solar desse mesmo local, bem como o conhecimento da temperatura do ar (*Kreith, 1978*). Para o estudo da temperatura vamos utilizar também a base de dados indicada no ponto 4.1.1, constituída pelos dados diários das seis estações do IM, do arquipélago da Madeira. Para o nosso estudo utilizaremos os valores das temperaturas, que estão indicadas na Tabela 4.4, ou seja: temperatura média do dia ( $T_{med}$ ), temperatura máxima do dia ( $T_{máx}$ ) e temperatura mínima do dia ( $T_{mín}$ ).

Tabela 4.4 Temperaturas diárias registadas nas estações do IM

$T_{med}$ 09	°C	Temperatura média (09-09 h)
$T_{máx}$ 09	°C	Temperatura máxima (09-09 h)
$T_{mín}$ 09	°C	Temperatura mínima (09-09 h)

O número de dias mensal de que se dispõe de dados de cada uma das estações do IM, no período 2002-2005, está indicado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Dias com dados de temperatura nas estações do IM do arquipélago da Madeira no período 2002-2005

<b>Mês / Estação</b>	<b>Funchal</b>	<b>P. Santo</b>	<b>Areiro</b>	<b>L. Baixo</b>	<b>S. Jorge</b>	<b>P. Pargo</b>
<b>Janeiro</b>	124	82	91	93	93	93
<b>Fevereiro</b>	113	76	98	98	103	99
<b>Março</b>	123	65	124	123	122	124
<b>Abril</b>	117	58	113	119	119	119
<b>Maió</b>	124	62	124	119	124	124
<b>Junho</b>	120	60	119	120	120	120
<b>Julho</b>	124	93	120	124	113	124
<b>Agosto</b>	124	93	124	124	124	124
<b>Setembro</b>	120	90	120	120	120	120
<b>Outubro</b>	124	93	111	122	117	120
<b>Novembro</b>	120	90	120	120	120	117
<b>Dezembro</b>	124	93	122	124	118	117
<b>Anual</b>	<b>1457</b>	<b>955</b>	<b>1386</b>	<b>1406</b>	<b>1393</b>	<b>1401</b>

#### 4.2.2 Temperaturas médias mensais e anual

A partir da base de dados do conjunto de estações e para o período 2002-2005, e utilizando todos os valores disponíveis, determinaram-se para cada estação, as temperaturas médias diárias mensais, as temperaturas médias das máximas diárias mensais, e as temperaturas médias das mínimas diárias mensais de cada um dos doze meses do ano e, a partir destas, as temperaturas médias diárias anuais, as temperaturas médias das máximas diárias anuais, e as temperaturas médias das mínimas diárias anuais, Tabela 4.6a e 4.6b. As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 mostram a evolução dessas temperaturas mês a mês.

Tabela 4.6a Temperaturas médias, média das máximas diárias, e média das mínimas diárias, mensais e anual, nas estações do IM no arquipélago da Madeira no período 2002-2005

<i>ESTAÇÃO</i>	<i>Areeiro</i>			<i>Funchal</i>			<i>Lugar de Baixo</i>		
<b>Temperatura</b>	<b>MAX</b>	<b>MED</b>	<b>MIN</b>	<b>MAX</b>	<b>MED</b>	<b>MIN</b>	<b>MAX</b>	<b>MED</b>	<b>MIN</b>
Janeiro	9.33	6.51	4.05	20.39	16.86	14.33	20.82	17.25	15.10
Fevereiro	7.83	5.39	3.13	20.12	16.35	13.76	20.72	17.00	14.56
Março	9.38	6.43	3.88	20.74	16.93	14.11	21.17	17.39	14.78
Abril	9.56	6.55	3.82	20.93	17.19	14.54	21.44	17.69	15.13
Maiο	11.80	8.77	5.75	22.48	18.77	15.96	23.19	19.29	16.41
Junho	16.79	13.26	9.82	24.55	21.13	18.70	25.92	21.86	19.07
Julho	18.21	14.65	11.22	26.50	22.70	20.11	27.31	23.31	20.40
Agosto	18.20	14.57	11.55	27.73	23.64	20.99	28.36	24.16	21.27
Setembro	17.01	13.41	10.59	27.60	23.38	20.64	27.94	23.83	21.07
Outubro	14.15	10.82	8.05	25.35	21.48	19.01	25.53	21.82	19.38
Novembro	10.38	7.84	5.53	22.55	18.98	16.54	23.22	19.46	17.06
Dezembro	8.95	6.49	4.28	21.08	17.54	15.16	21.55	18.13	15.89
Anual	<b>12.66</b>	<b>9.58</b>	<b>6.83</b>	<b>23.35</b>	<b>19.60</b>	<b>17.01</b>	<b>23.95</b>	<b>20.12</b>	<b>17.53</b>

Tabela 4.6b Temperaturas médias, média das máximas diárias, e média das mínimas diárias, mensais e anual, nas estações do IM no arquipélago da Madeira no período 2002-2005

<i>ESTAÇÃO</i>	<i>Ponta do Pargo</i>			<i>São Jorge</i>			<i>Porto Santo</i>		
<b>Temperatura</b>	<b>MAX</b>	<b>MED</b>	<b>MIN</b>	<b>MAX</b>	<b>MED</b>	<b>MIN</b>	<b>MAX</b>	<b>MED</b>	<b>MIN</b>
Janeiro	17.62	14.55	12.35	17.10	14.51	12.63	18.24	15.81	13.30
Fevereiro	17.40	14.28	12.03	16.93	14.28	12.30	18.29	15.54	13.08
Março	17.73	14.69	12.40	17.80	14.80	12.46	18.64	15.72	13.08
Abril	18.67	15.05	12.64	18.05	14.90	12.67	19.35	16.26	13.87
Maiο	20.70	16.66	14.12	20.16	16.43	14.12	20.78	17.70	15.45
Junho	23.58	19.42	16.78	23.03	19.26	16.68	23.33	20.52	18.46
Julho	25.73	21.15	18.23	24.72	20.55	17.99	25.27	22.11	19.96
Agosto	26.12	21.83	19.21	25.58	21.59	19.10	26.24	23.17	20.98
Setembro	25.70	21.52	18.98	25.30	21.22	18.75	25.57	22.58	20.39
Outubro	22.65	19.44	17.21	22.55	19.21	17.00	23.18	20.52	18.02
Novembro	19.90	16.92	14.76	19.56	16.85	14.86	20.32	17.93	15.55
Dezembro	18.09	15.40	13.45	17.72	15.22	13.38	18.51	16.47	14.47
Anual	<b>21.18</b>	<b>17.59</b>	<b>15.20</b>	<b>20.73</b>	<b>17.42</b>	<b>15.18</b>	<b>21.50</b>	<b>18.71</b>	<b>16.40</b>

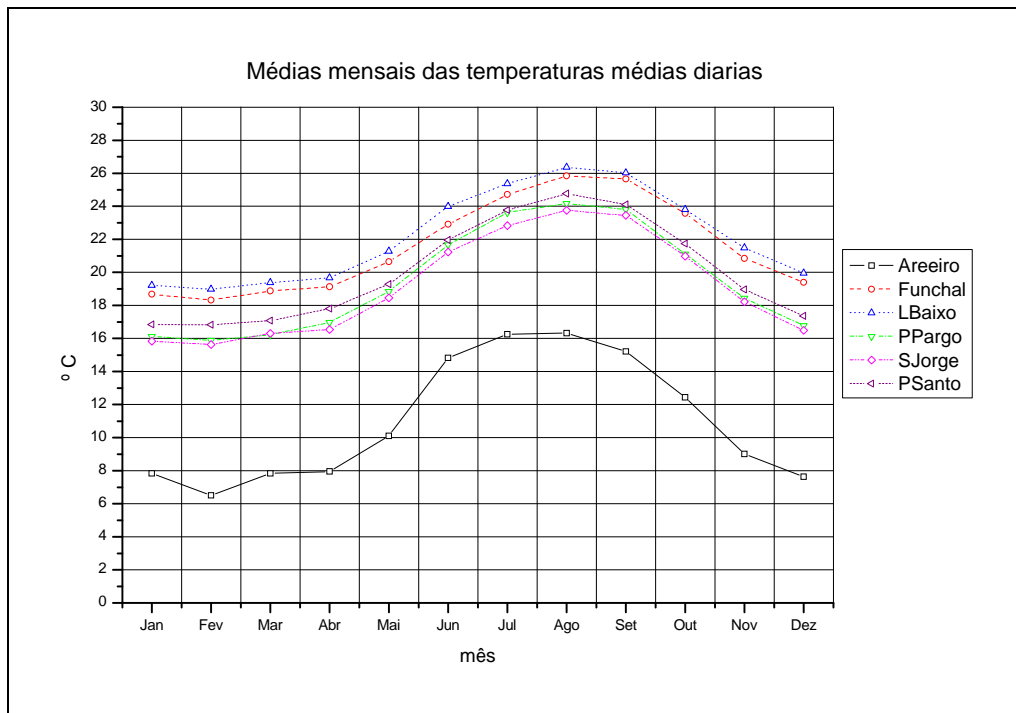


Figura 4.15 Evolução das temperaturas médias diárias mensais nas seis estações do Instituto de Meteorologia - período 2002-2005

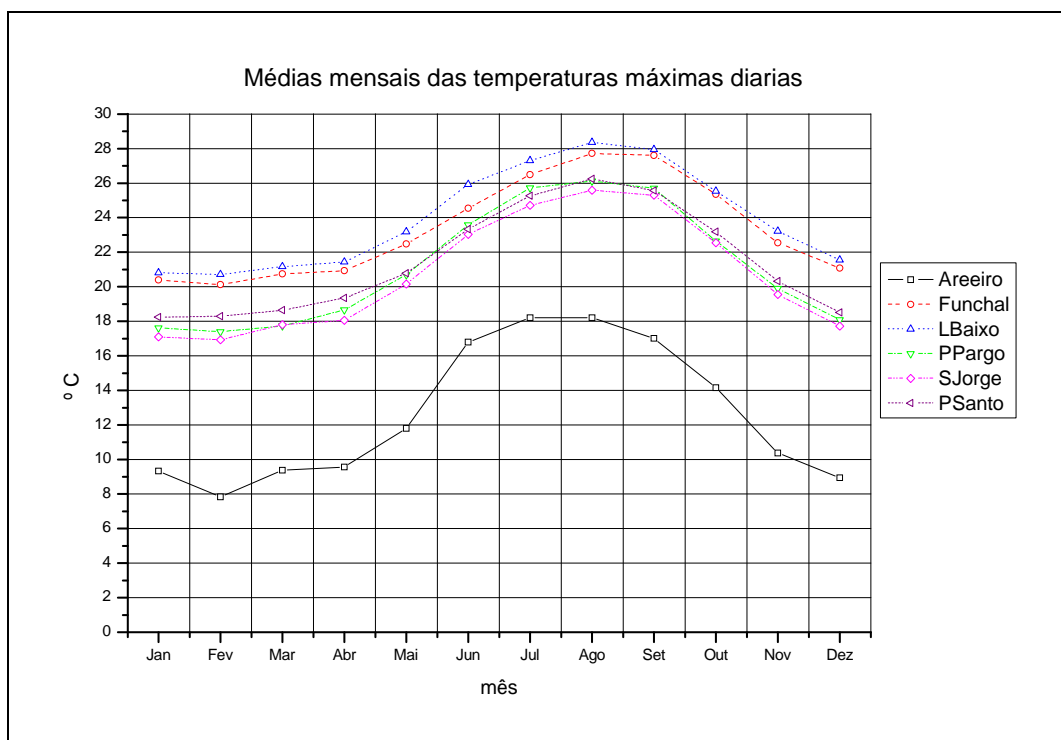


Figura 4.16 Evolução das temperaturas médias mensais das máximas diárias nas seis estações do Instituto de Meteorologia - período 2002-2005

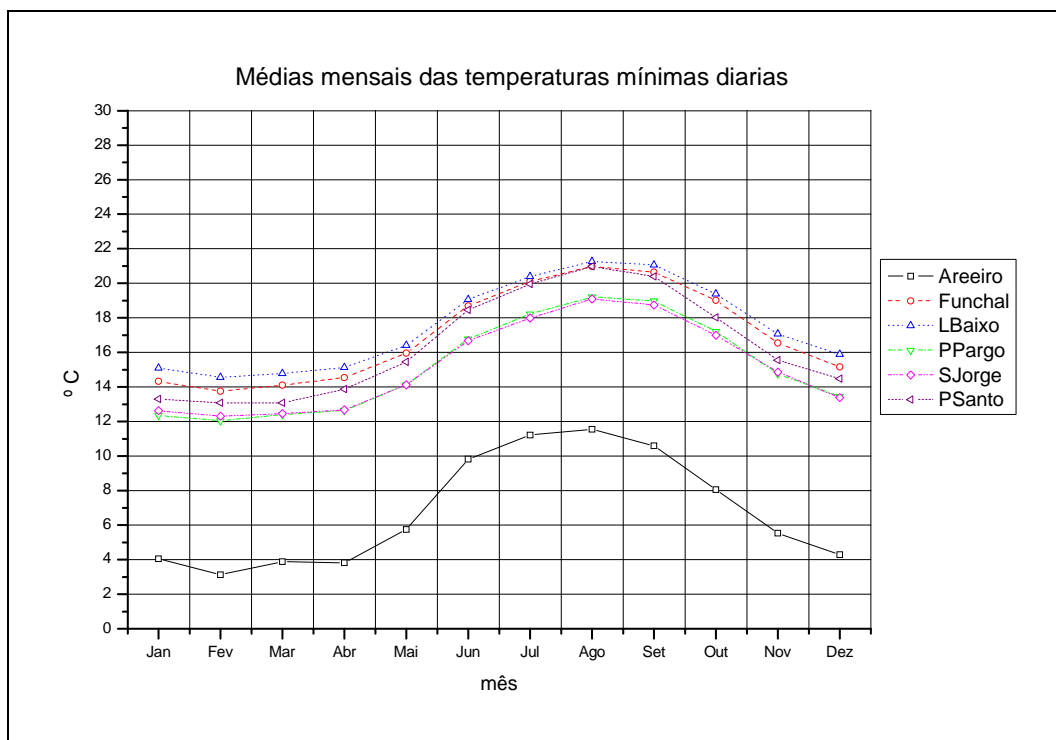


Figura 4.17 Evolução das temperaturas médias mensais das mínimas diárias nas seis estações do Instituto de Meteorologia - período 2002-2005

Uma análise às Figuras 4.15, 4.16, e 4.17 mostra, em primeiro lugar, que as máximas anuais se registam em todas as estações ao redor do mês de Agosto, e as mínimas em torno do mês de Fevereiro.

Em segundo lugar, a evolução das temperaturas ao longo do ano, tanto no caso das médias como nas médias dos valores máximos e nas médias dos valores mínimos, segue uma tendência similar em todas as estações.

Em terceiro lugar, verifica-se claramente que o Areiro tem em todos os casos uma temperatura significativamente menor que as outras cinco estações, e, dentro destas, têm menor temperatura a de Ponta do Pargo e São Jorge, do que as do Porto Santo, Funchal e Lugar de Baixo.

Facilmente se pode inferir que, sem dúvida, a altitude da estação é um factor determinante nestas diferenças, de tal maneira que quanto maior for a altitude menor são, em geral, as temperaturas médias.

### 4.2.3 Dias característicos de temperatura de cada mês

Como se indicou no ponto 4.1.3, o cálculo da produção fotovoltaica em qualquer lugar pode ser determinado com base apenas nos dias característicos representativos de cada mês. No que diz respeito à temperatura, um dia característico de um mês seria um dia com uma duração do dia (horas máximas de sol), igual a média do mês, cuja temperatura média em horas de luz fosse igual à média do mês nessas mesmas horas, e cuja distribuição de temperaturas ao longo do dia coincida também com a média do mês. Em caso de se dispor apenas de valores médios diários, máximos e mínimos de temperatura, como é o caso das estações do IM, pode-se obter uma aproximação à distribuição da temperatura, mediante expressões indicadas em várias literaturas. No nosso caso utilizamos uma distribuição sinusoidal que utiliza os valores de temperatura máxima e mínima diários, e que tem sido amplamente experimentada (*Aguilar et al.*, 2006).

A expressão sinusoidal que traduz esta variação de temperatura é dada por:

$$T_a = T_{am} + \frac{T_{aM} - T_{am}}{2} [1 + \cos(aw + b)], \text{ sendo } -w_s \leq w \leq w_s \quad (4.4)$$

$$\text{donde } a = \frac{\pi}{w_s - \pi/6} \text{ e } b = -a\pi/6 \quad (4.5)$$

Sendo:

$T_a$  temperatura do ar num dado instante °C

$T_{aM}$  temperatura do ar máxima do dia característico °C

$T_{am}$  temperatura do ar mínima do dia característico °C

$w$  ângulo horário nesse instante, em radianos

$w_s$  ângulo horário ao anoitecer ( $-w_s$  é o ângulo horário ao amanhecer), em radianos, correspondendo ao dia característico do mês à latitude de referência 32.75 °

Contudo, devem verificar-se as condições a seguir indicadas para que a distribuição sinusoidal não apresente erros significativos:

- A temperatura mínima do dia deve verificar-se ao amanhecer (ângulo horário  $-w_s$ );
- A temperatura máxima do dia deve verifica-se 2 horas depois do meio dia solar, isto é, para um ângulo horário de  $30^\circ (+\pi/6 \text{ radianos})$ .

No nosso caso aplicamos as referidas expressões aos dias característicos do mês, tal como definimos no ponto 4.1.3 da Tabela 4.4, e com os valores da temperatura das Tabela 4.6a e 4.6b.

As Figuras 4.18 a 4.29 mostram a distribuição sinusoidal da temperatura ao longo do dia característico para cada um dos meses do ano das estações do IM.

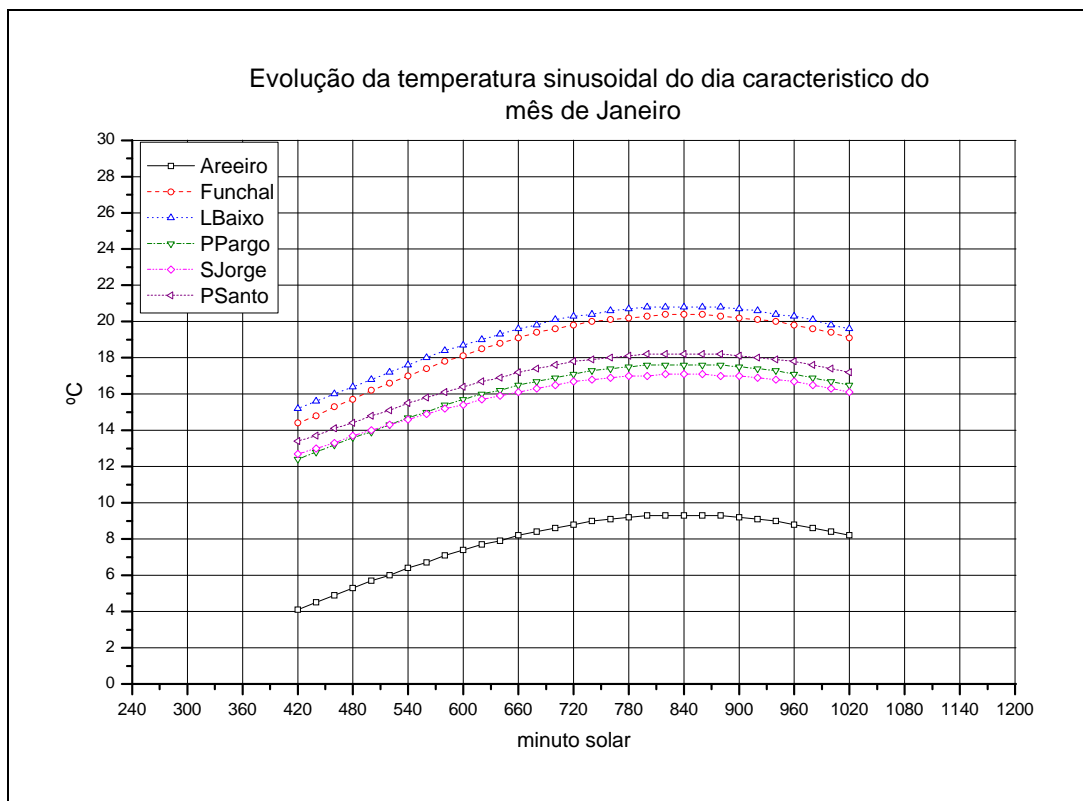


Figura 4.18 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Janeiro

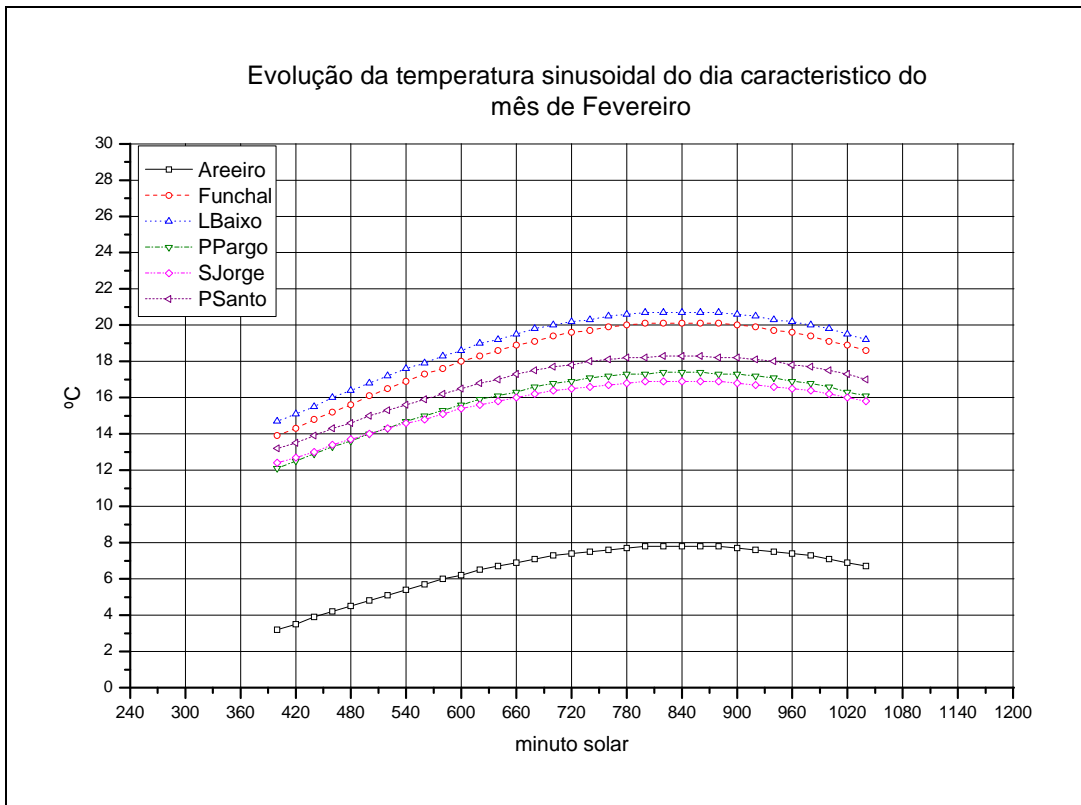


Figura 4.19 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Fevereiro

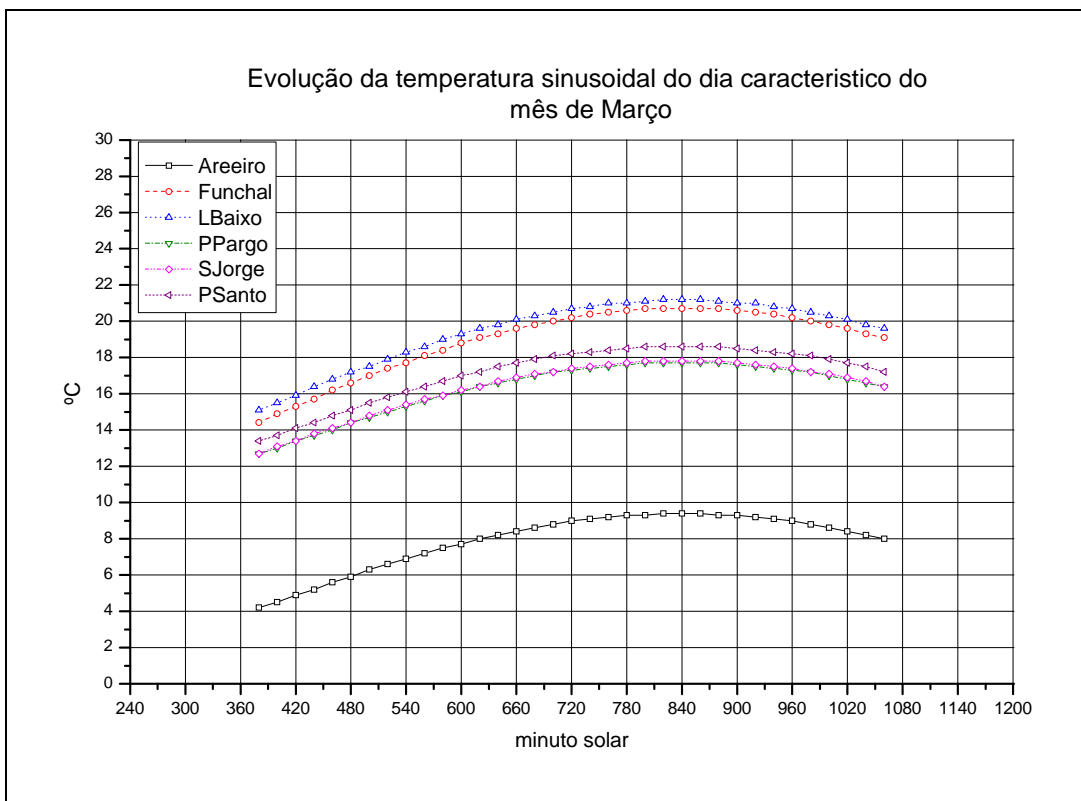


Figura 4.20 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Março

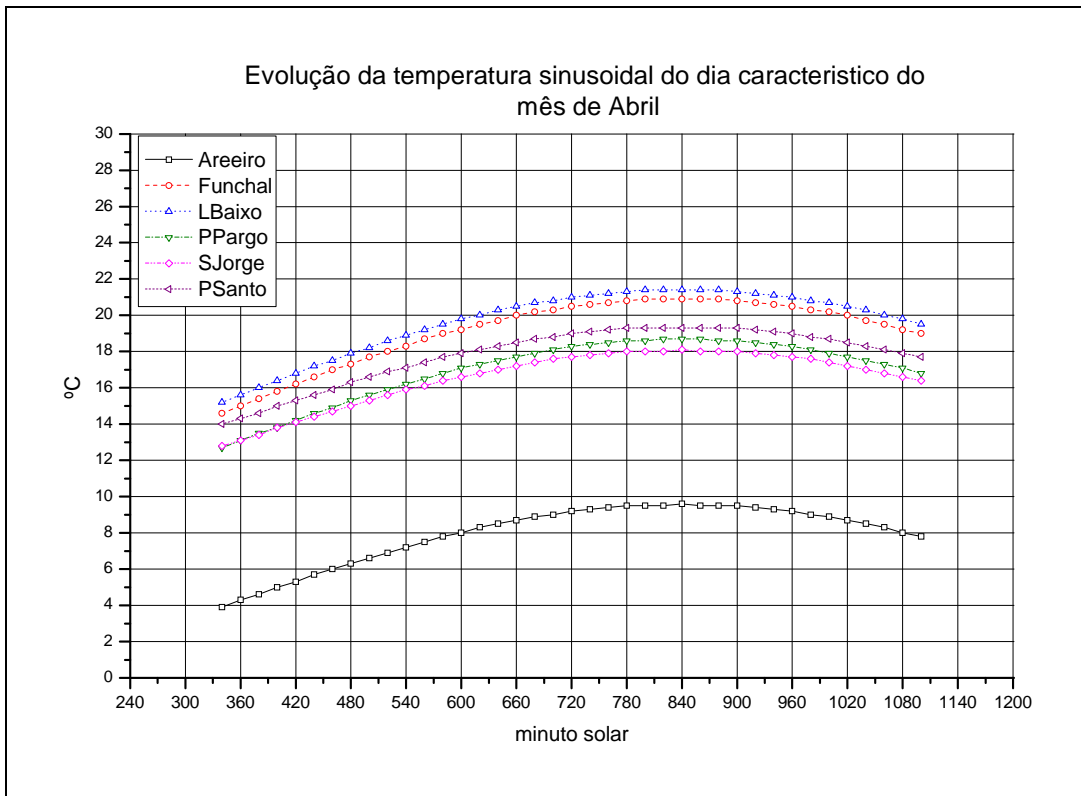


Figura 4.21 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Abril

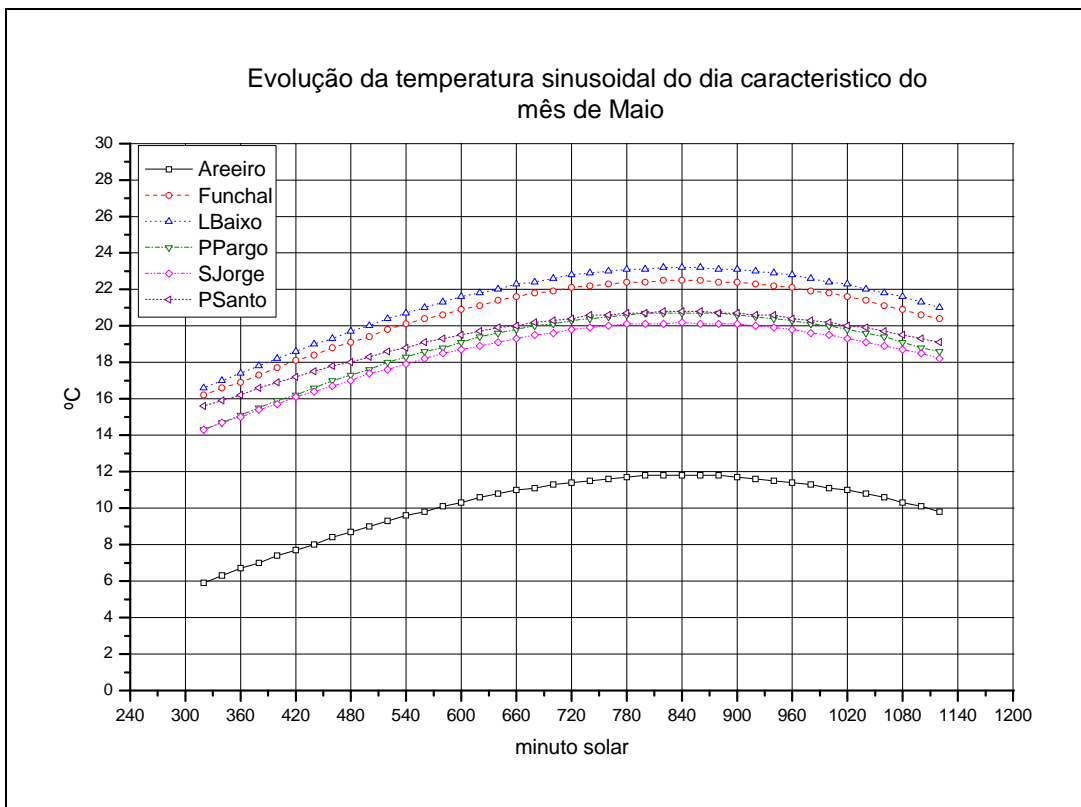


Figura 4.22 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Maio

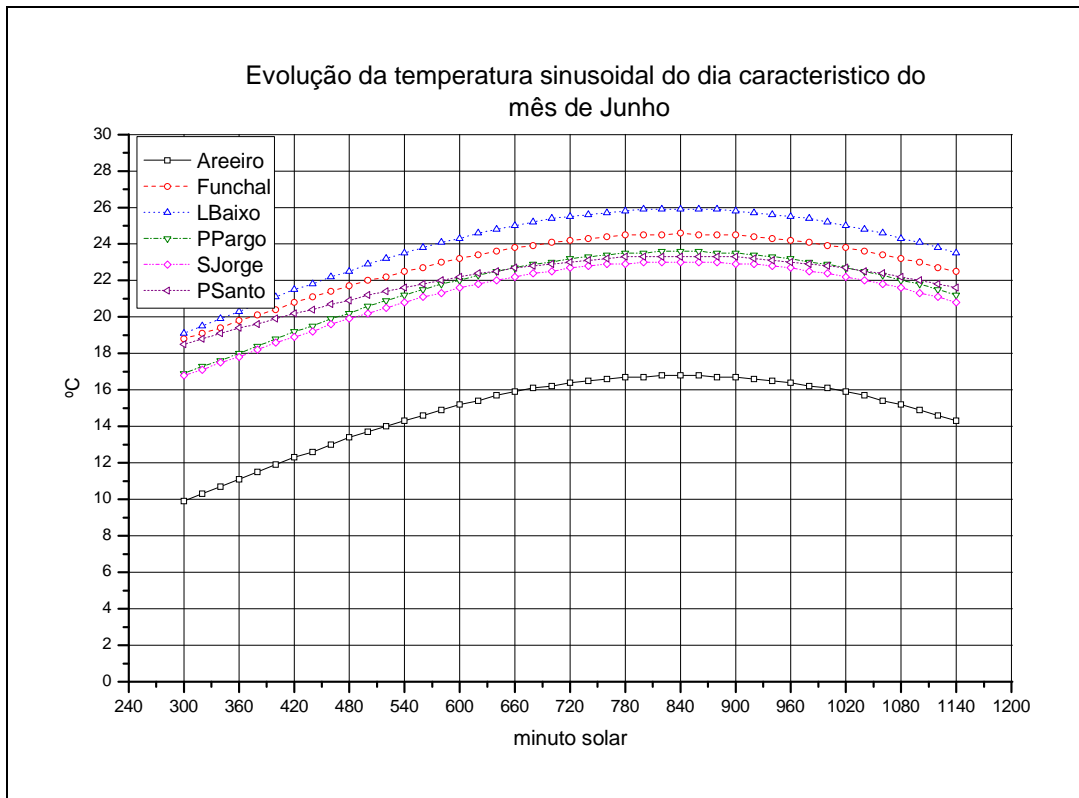


Figura 4.23 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Junho

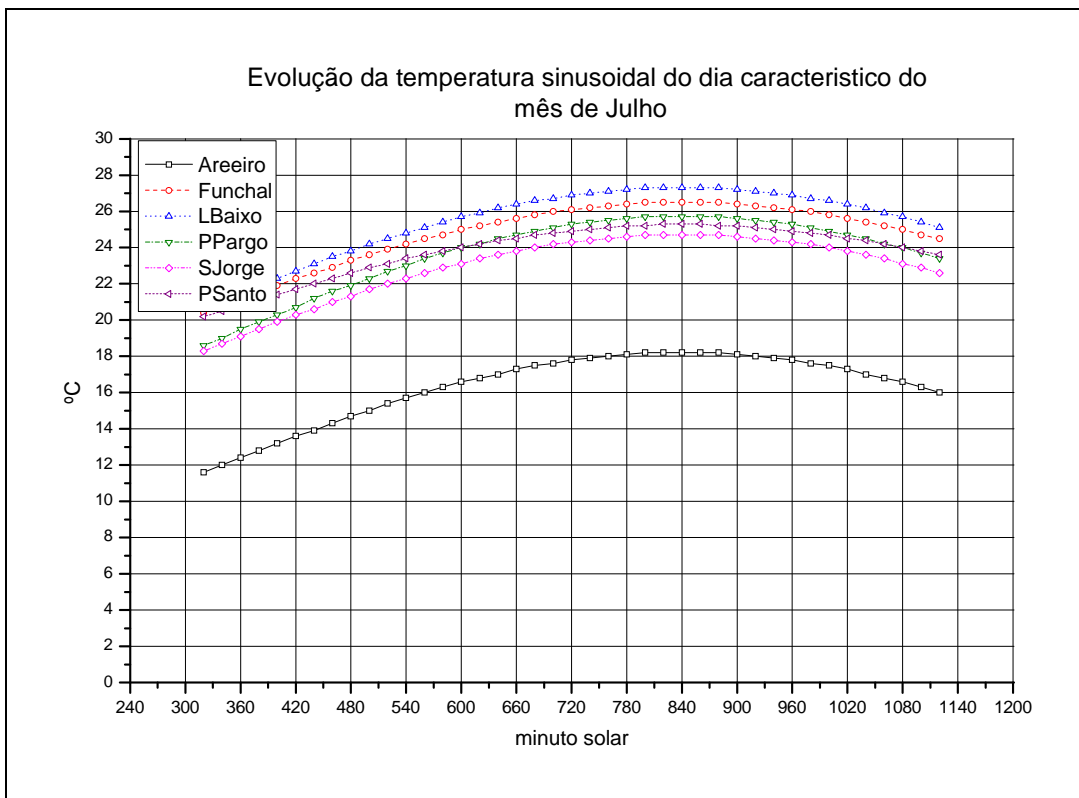


Figura 4.24 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Julho

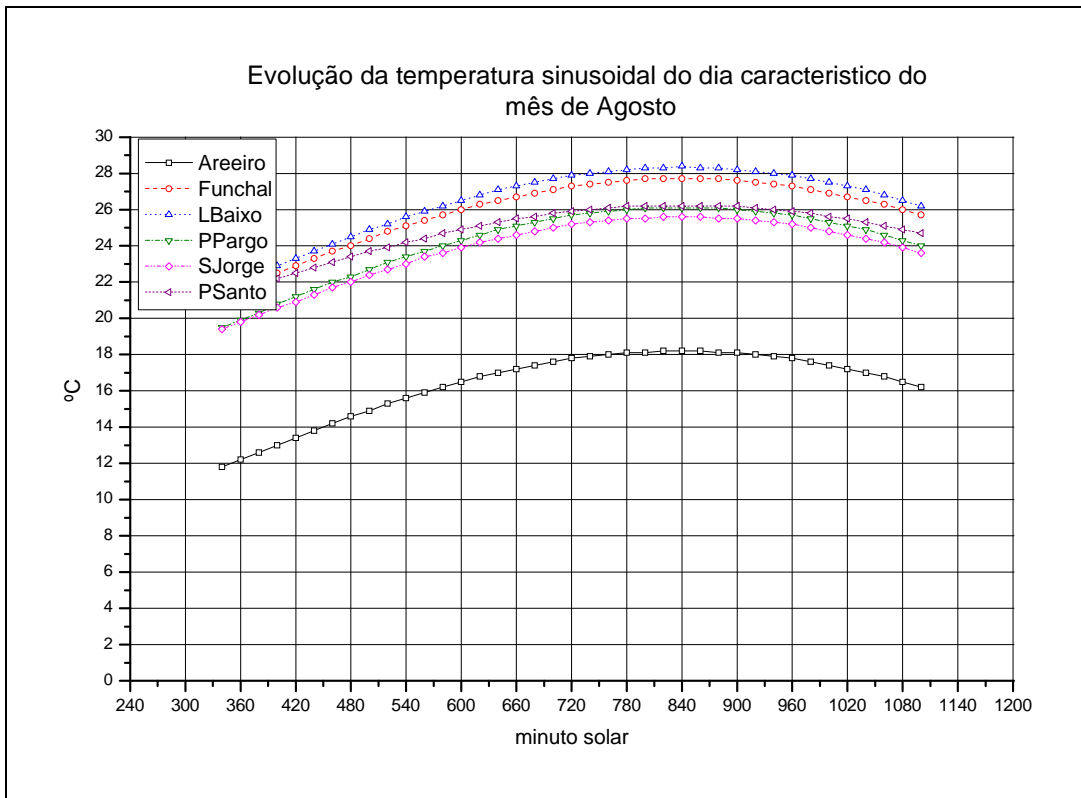


Figura 4.25 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de agosto

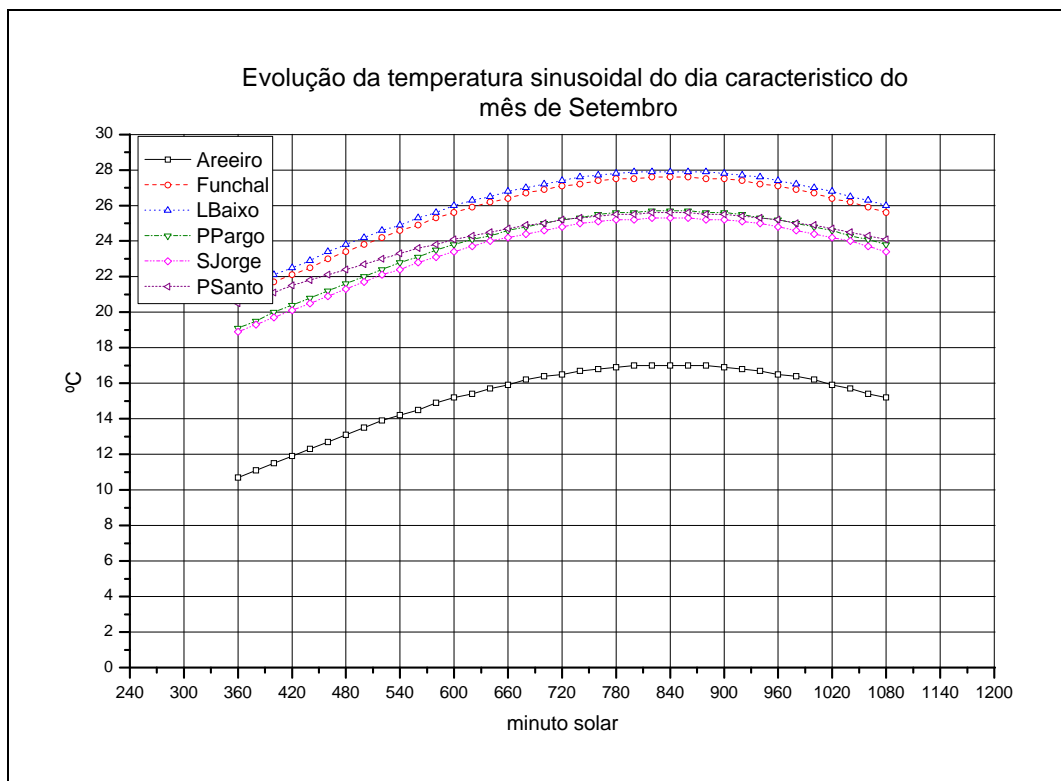


Figura 4.26 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Setembro

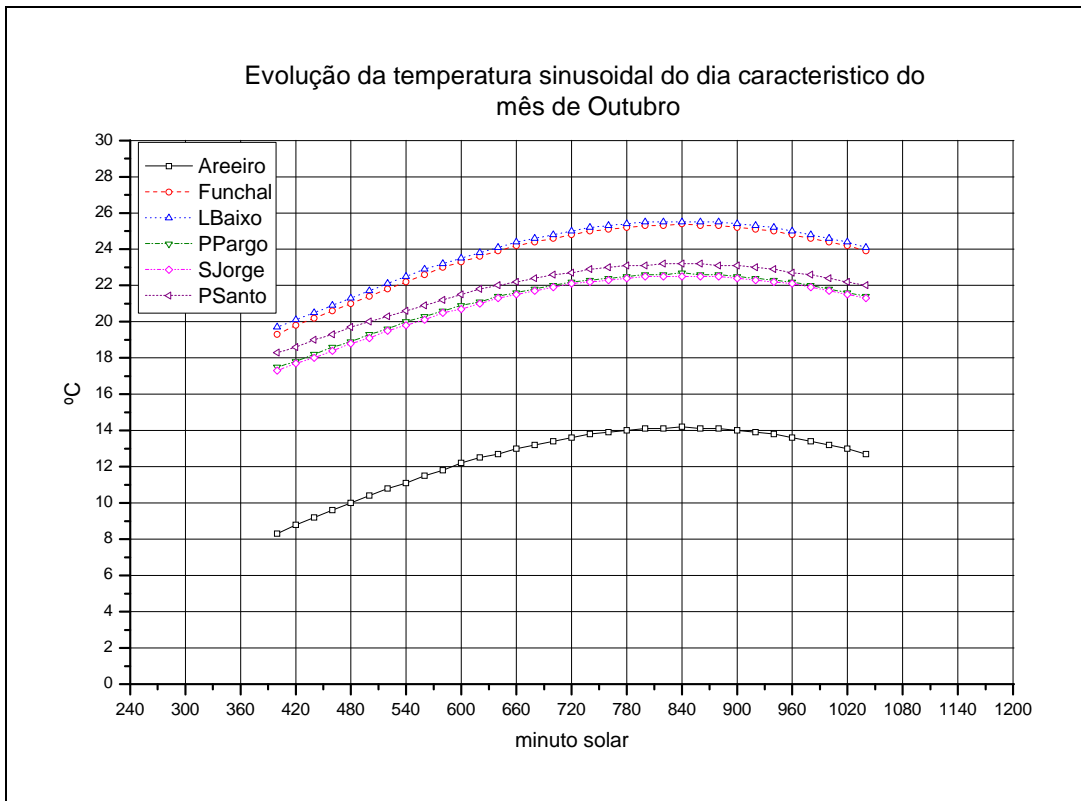


Figura 4.27 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Outubro

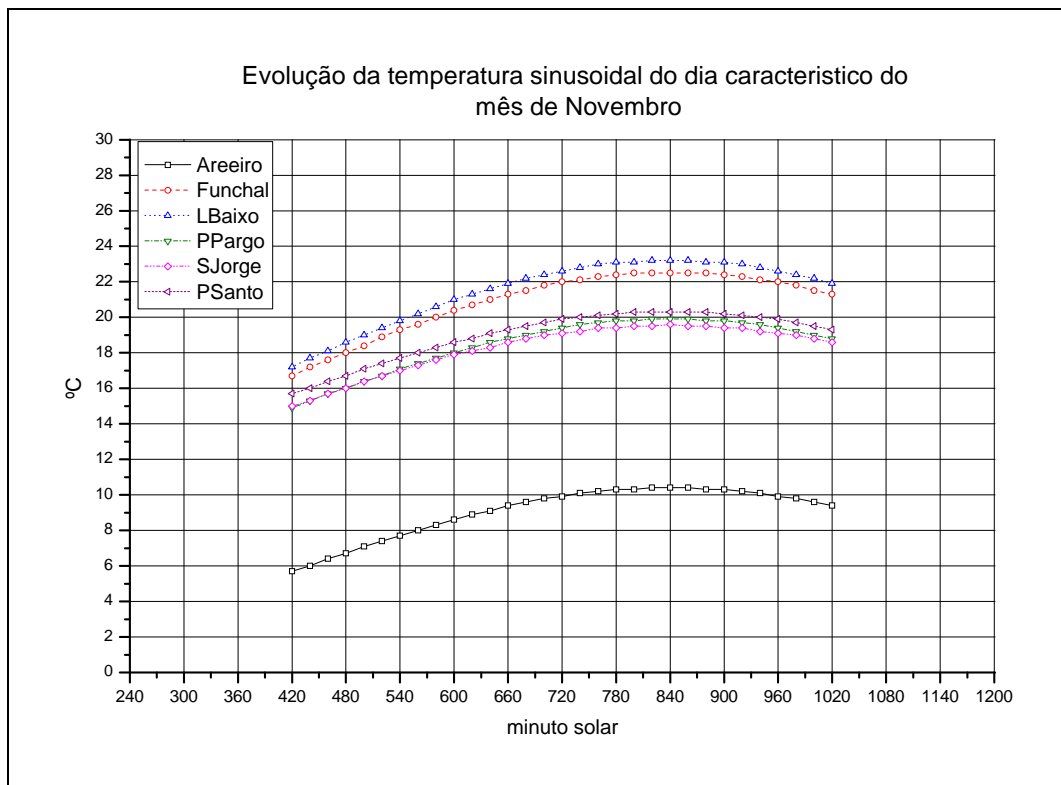


Figura 4.28 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Novembro

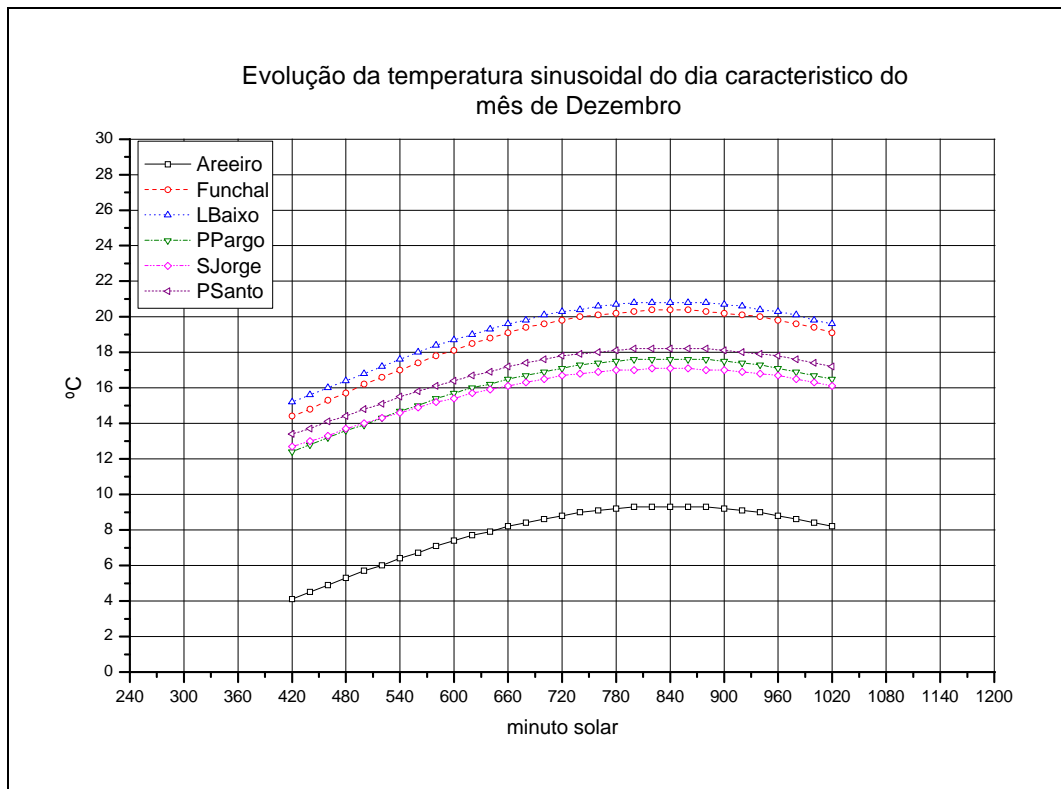


Figura 4.29 Distribuição da temperatura ao longo do dia característico do mês de Dezembro.

## CAPITULO 5

### ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO FOTOVOLTAICA EM SEIS ESTAÇÕES

---

## 5. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO FOTOVOLTAICA EM SEIS ESTAÇÕES

### 5.1 INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA TIPO

O objectivo da tese é a “Optimização de Sistemas Híbridos Fotovoltaicos e Eólicos em Zonas Insulares de Diversidade Climática”, o qual requer tratar conjuntamente sistemas mistos fotovoltaico-eólicos. Antes desse tratamento conjunto, que será levado a cabo no capítulo VI, abordaremos o comportamento dos sistemas fotovoltaicos, o que tornará mais fácil o estudo posterior dos sistemas híbridos.

De acordo com objectivo da tese, serão estudados os sistemas fotovoltaicos sem ligação directa à rede eléctrica, ou seja, sistemas isolados da rede, designados por autónomos ou do tipo *stand alone* (Rodrigues, et al., 2006). Estes sistemas requerem uma componente de armazenamento da energia para posterior consumo de noite e/ou em dias de céu nublado. Normalmente, este armazenamento faz-se mediante a utilização de baterias de chumbo-ácido, com características específicas para aplicações fotovoltaicas. Contudo, estas baterias têm perdas quer durante operação de carga, quer durante a operação de descarga (Hille, et al., 1995), (Cordes, 2000) (Joyce, 2005) e (Aguiar, et al. 2002).

Para a realização do nosso estudo, foi necessário definir uma instalação solar fotovoltaica tipo, que é basicamente constituída por um gerador solar (um conjunto de módulos fotovoltaicos), um regulador de carga e um inversor para converter a corrente contínua em corrente alterna, que é a forma habitual de utilização.

É importante e necessário fazer-se um estudo prévio da produção máxima possível por metro quadrado de módulo fotovoltaico instalado, para efeitos de comparação posterior, produção que é a que se poderia obter numa instalação ligada à rede. Por outro lado, os resultados obtidos deste estudo serão aplicados às instalações híbridas.

### 5.2 DEFINIÇÃO DA INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA

A produção e o rendimento de uma instalação fotovoltaica estão condicionados às condições climatológicas do local (radiação solar e temperatura do ar), à área do gerador fotovoltaico

(ou sua potência em Wp), à orientação e inclinação dos módulos, à existência ou não de sombras que afectem o gerador, à qualidade e rendimento dos módulos, à sua limpeza, ao rendimento dos reguladores de carga e do inversor, às baterias, e secção da cabeleagem, bem como ao modo como a instalação é usada pelo utilizador, (Rodrigues, 1997), (Aguilar, et al., 2002), (Bravo, et al., 2004), (Aguilar et al., 2006). Como já foi referido, seleccionámos como locais de estudo, os locais onde se encontram localizadas as seis estações do Instituto de Meteorologia da Madeira, dos quais dispomos de dados de radiação solar e temperatura. No cálculo que se fará mais adiante, utilizaremos os dias característicos de cada mês do ano de radiação solar e temperatura, obtidos no capítulo anterior.

Como o objectivo desta tese é estudar a influência da optimização dos sistemas nas diferentes zonas insulares de diversidade climática, para se poder comparar, é necessário considerar exactamente o mesmo sistema para cada um dos locais de estudo. Um dos problemas com que nos deparamos está relacionado com a orientação e inclinação dos módulos. Ou utilizamos para cada local a orientação e a inclinação óptima, o que faz com que as inclinações e orientações sejam diferentes para cada um dos locais, ou então utilizamos para todos a mesma orientação e inclinação, o que poderia ser vantajoso para uns e desvantajoso para outros (Rocha, 1983 e 1984). Por outro lado, quando se colocam os módulos com uma determinada inclinação, uma parte da radiação solar que incide sobre os mesmos é reflectida para o terreno.

Como as características do terreno diferem de local para local, reflectindo também de forma diferente, teríamos que caracterizar o coeficiente de reflexão deste em cada um dos locais, para que o estudo fosse mais preciso, no entanto tal precisão não é o objectivo desta tese. Estes problemas são solucionados desde que se considere os módulos colocados num plano horizontal. Desta forma, a única radiação solar que recebem é a radiação global ou total, que é justamente a que se mede nas estações, e que é a que também foi utilizada para a determinação dos dias característicos referidos no capítulo anterior. Por outro lado, a colocação dos módulos num plano horizontal, permite referir a produção fotovoltaica não só por cada metro quadrado de módulo, ou por cada metro quadrado de superfície horizontal (já que ambas as superfícies coincidem) o que, por sua vez permite comparar a energia eléctrica produzida com a energia solar recebida nesse mesmo plano.

Deste modo, é possível extrapolar os resultados de forma fácil a toda a superfície do arquipélago. Iremos também assumir como condição de estudo que não existem sombras de nenhum tipo que afectem os módulos fotovoltaicos. O estudo será limitado apenas à produção de energia eléctrica em corrente contínua, produzida à saída do regulador, e não vamos ter em conta as perdas nas baterias nem no inversor, dado que estas perdas tanto se verificam nas instalações fotovoltaicas, eólicas ou híbridas, já que o armazenamento da energia é feito em baterias, e é sempre necessário utilizar o inversor para transformar a corrente contínua em corrente alterna.

Assim, estas perdas não têm influência no cálculo da optimização dos sistemas híbridos, tendo em conta que a optimização vai consistir em definir a proporção óptima dos componentes fotovoltaico e eólico para cada um dos locais de estudo (*Carrasco, et al., 1996*). Em resumo, a instalação tipo que vamos considerar em todas as estações será constituída por um módulo fotovoltaico, colocado num plano horizontal, e um regulador de carga para se obter sempre a máxima potência possível. Os modelos de módulo fotovoltaico e de regulador de carga escolhidos são os mesmos para todas as instalações e apresentam boas características técnicas, podendo ser adquiridos facilmente no mercado.

### 5.3 CARACTERÍSTICAS DA INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA

#### 5.3.1 Características do módulo fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos têm rendimentos diferentes, sendo os mais utilizados constituídos por células, que são classificadas de acordo com os materiais e a sua estrutura interna do seguinte modo:

Célula	Rendimento %
Silício monocristalino	16 e 25
Silício policristalino	12 e 13
Silício amorfo	6 e 8

No nosso caso, o módulo seleccionado é constituído por 72 células de silício monocristalino ligadas em série, e apresenta as seguintes características nominais:

Potência nominal máxima ( $P_{máx}$ ):	210Wp <sup>7</sup> (Potência de pico)
Corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ):	5,85 A
Tensão a circuito aberto ( $V_{oc}$ ):	47,65 V
Dimensões úteis (comprimento e largura):	1559 x 798 mm
Área útil (A):	1,244 m <sup>2</sup>
Temperatura de operação nominal da célula (NOCT) <sup>8</sup> :	48,5 °C
Coeficiente de temperatura ( $I_{sc}$ ):	2,27 mA/ °C
Coeficiente de temperatura ( $V_{oc}$ ):	- 0,1368 V/ °C
Coeficiente de temperatura ( $P_m$ ):	- 0,287 %/°C

O comportamento e as características eléctricas do módulo são dadas através da curva característica I-V, representação gráfica da equação que relaciona a corrente em função da tensão, denominada também curva característica ou curva “IV”, que para as condições nominais está representada na Figura 5.1. A potência obtém-se através do produto da corrente pela tensão no ponto em que está a funcionar (Lorenzo, E., 1994), (Garcia, 1993) e (Markvat, et al., 2003).

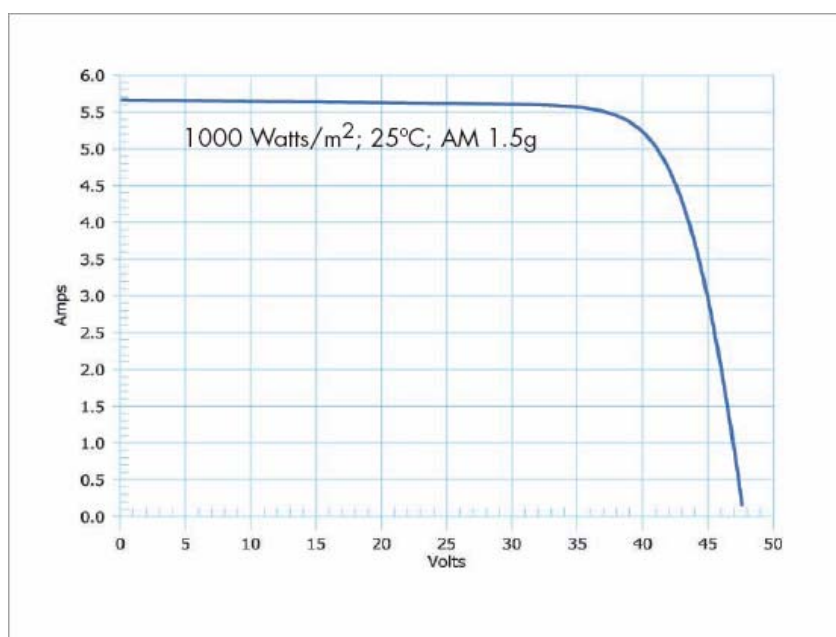


Figura 5.1 Curva característica I-V do módulo fotovoltaico

<sup>7</sup> Wp-Watt pico – corresponde à potência produzida pelo painel solar constituído por um conjunto de células FV quando colocado perpendicularmente aos raios solares incidentes e ao meio dia solar de um dia de céu azul-Nestas condições -1000 W.m<sup>2</sup> - com um rendimento de conversão de 10 %, um painel de 1 m<sup>2</sup> produziria 100Wp. [Collares Pereira, 1998 ]

<sup>8</sup> \* (NOCT, Nominal Operation Cell Temperature) indica a temperatura que esta alcança quando é submetida às seguintes condições de funcionamento: irradiância de 800 W/m<sup>2</sup>, massa óptica de AM = 1,5, temperatura ambiente de 20 °C e velocidade do vento 1 m/s.

### 5.3.2 Modelo matemático da característica $I$ - $V$ do módulo fotovoltaico

A comparação de dispositivos de conversão fotovoltaica, nomeadamente módulos, através do valor do parâmetro potência nominal máxima  $P_{m\acute{a}x}$ , deve ser efectuada em condições padrão de temperatura das células e de radiação solar, respectivamente 25 ° C, e uma irradiância de 1000 Wm<sup>2</sup> com distribuição espectral AM 1.5, que se designam habitualmente por valores pico ou valores de referência. Estas condições estão definidas nas normas ICE 60904 e IEC 60904-3. Para determinada potência de saída em qualquer condição climática, é necessário modelar matematicamente uma equação de corrente-tensão ( $I$ - $V$ ), que depende da radiação solar e da temperatura do ar. O modelo matemático escolhido está baseado na literatura apresentada por Lorenzo, E. (1994) (Markvat, et al., 2003), e que se explica do seguinte modo: o módulo fotovoltaico pode-se modelar pelo circuito equivalente que se mostra na Figura 5.2, constituído por um gerador eléctrico ( $I_L$ ), um díodo ( $I_D$ ), uma resistência em paralelo ( $R_P$ ), e uma resistência em série ( $R_S$ ).

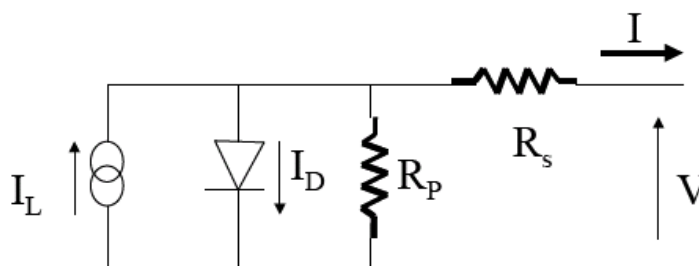


Figura 5.2 Circuito equivalente do módulo fotovoltaico

A equação que suporta este circuito é a seguinte:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{e(V + IR_s)}{mkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (5.1)$$

$I$	Corrente de saída do módulo
$I_L$	Corrente gerada
$I_D$	Corrente do díodo (É o segundo termo em exponencial da equação)
$I_0$	Corrente inversa de saturação do módulo
$e$	Carga eléctrica do electrão ( $q = 1,60218 \cdot 10^{-19}C$ )
$V$	Tensão à saída do módulo

$R_s$	Resistência em série
$m$	Factor de idealidade (indica o comportamento do díodo; díodo ideal $m = 1$ , díodo real $m > 1$ , normalmente considera-se 1,25)
$\kappa$	Constante de Boltzmann ( $1,38065 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ )
$T$	Temperatura absoluta do módulo $^\circ\text{C}$
$R_p$	Resistência em paralelo

Define-se o Potencial Térmico ou de referência  $V_t$  como

$$V_t = \frac{mkT}{e} \quad (5.2)$$

$V_t \approx 25 \text{ mV}$  com  $m=1$  e  $T=300 \text{ }^\circ\text{K}$

$$V_t = 25,7 \text{ mV}$$

### 5.3.3 Simplificações do modelo matemático da característica $I$ - $V$ do módulo fotovoltaico

A equação 5.1 não se pode utilizar directamente dado que alguns parâmetros que nela aparecem, em particular,  $I_L$  e  $I_0$  não têm uma medida directa e são difíceis de se conhecer. Por essa razão utilizam-se outros métodos que, ainda que simplificados, permitem obter potências de funcionamento a partir dos dados fornecidos pelo fabricante em condições nominais, e das variáveis climatológicas radiação solar e temperatura. Os pressupostos para a utilização do modelo simplificado, que se consideram aceitáveis, já que não produzem erros consideráveis quando os módulos são de silício cristalino, são os seguintes:

- Os efeitos da resistência em paralelo  $R_p$  são desprezáveis
- A corrente gerada  $I_L$  e a corrente de curto circuito  $I_{SC}$  são iguais
- O valor da exponencial na equação 5.1 é maior que a unidade em qualquer condição de trabalho

Os anteriores pressupostos permitem transformar a equação 5.1 na seguinte:

$$I = I_{sc} - I_0 \exp\left(\frac{V + IR_s}{V_t}\right) \quad (5.3)$$

Se nesta equação considerarmos  $I=0$ , obtemos a seguinte:

$$I_0 = I_{sc} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{V_t}\right) \quad (5.4)$$

Substituindo 5.4 em 5.3 obtém-se a expressão simplificada:

$$I = I_{sc} \left[ 1 - \exp\left(\frac{V - V_{oc} + IR_s}{V_t}\right) \right] \quad (5.5)$$

Contudo, esta equação apresenta o inconveniente do seu carácter implícito já que  $I$  aparece em ambos os termos. No entanto, na zona do ponto de máxima potência pode-se considerar  $I=I_{sc}$  sem introduzir grandes erros (*Minderico, 1999*).

#### 5.3.4 Método simplificado para o cálculo da potência máxima do módulo

A potência de saída,  $P$ , obtém-se pelo produto de  $I$  por  $V$ , ( $P = I \cdot V$ ) da equação 5.5. O ponto de máxima potência  $P_{m\acute{a}x}$  pode-se obter, então, fazendo a derivada igual a zero,  $dP/dV = 0$ . Todavia, o carácter implícito da equação aconselha a utilizar outros métodos mais precisos, em geral relacionados com o factor de forma e a tensão de circuito aberto. Para obtê-las, recorreremos a uma série de desenvolvimentos matemáticos que aparecem na publicação anteriormente referida (*Lorenzo, E. 1994*).

Em primeiro lugar, definem-se os parâmetros adimensionais  $v_{oc}$  e  $r_s$

$$v_{oc} = V_{oc} / V_t \quad r_s = R_s / (V_{oc} / I_{sc})$$

Este parâmetro tem uma grande relevância já que se considera constante o valor de  $R_s$ , para qualquer condição de trabalho – temperatura e radiação solar – do módulo

Por outro lado, define-se o factor de forma  $FF$  que indica a relação entre os valores de potência máxima e o produto da corrente de curto-circuito pela tensão a circuito aberto.

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{P_M}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = FF_0(1 - r_s)$$

$$\text{donde } FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{v_{oc} + 1}$$

Os valores  $(I_m - V_m)$  no ponto de máxima potência calculam-se a partir dos valores da tensão a circuito aberto e da corrente de curto-circuito, fornecidos pelo fabricante, mediante as seguintes expressões:

$$\frac{V_m}{V_{oc}} = 1 - \frac{b}{v_{oc}} \ln a - r_s(1 - a^{-b}) \quad \text{e} \quad \frac{I_m}{I_{oc}} = 1 - a^{-b}$$

$$\text{Sendo, } a = v_{oc} + 1 - 2 \cdot v_{oc} \cdot r_s \quad \text{e} \quad b = \frac{a}{1 + a}$$

O procedimento para a determinação do ponto de máxima potência  $(I_m, V_m)$  e, portanto, para o cálculo da potência máxima, em condições diferentes das condições nominais, é o seguinte:

Utilizando os valores nominais fornecidos pelo fabricante do módulo:

- Determinam-se os parâmetros  $V_t$  e  $v_{oc}$ , sendo  $m=1.25$ . Deve verificar-se que  $v_{oc} > 15$  para qualquer condição de trabalho em módulos monocristalinos e policristalinos.
- Calculam-se os factores de forma  $FF_0$  e  $FF$ , a partir da potência nominal máxima
- Calculam-se  $r_s$  e  $R_s$ , verificando que  $r_s < 0,4$ .  $R_s$  considera-se constante para qualquer condição de radiação solar e temperatura.
- Determinam-se os parâmetros  $a$  e  $b$ , e a seguir  $I_m$  e  $V_m$

### 5.3.5 Cálculo da potência máxima do módulo para qualquer valor de radiação e temperatura

No seguimento do que foi exposto, para calcular a  $P_{max}$  noutras condições de radiação solar,  $G$ , e da temperatura do ar  $T_a$  distintas das nominais, admitem-se as seguintes hipóteses: A corrente de curto-circuito do módulo  $I_{SC}(G)$  supõe-se inicialmente dependente exclusivamente da radiação solar através da função linear, que é obtida pela expressão:

$$I_{sc}(G) = \frac{I_{sc}(G_0 = 1000W / m^2)}{1000(W / m^2)} \cdot G(W / m^2)$$

Por outro lado, a temperatura de funcionamento das células  $T_C$ , depende exclusivamente da radiação solar e da temperatura do ar, e tendo em conta o valor NOCT fornecido pelo fabricante, obtém-se o seu valor aplicando:

$$T_c - T_a = \frac{NOCT(^{\circ}C) - 20}{800} \cdot G(W / m^2)$$

A tensão de circuito aberto  $V_{OC}$  de um módulo depende exclusivamente da temperatura das células solares  $T_C$ , nas condições reais de operação, sendo dada pelo coeficiente de variação com a temperatura indicado pelo fabricante.

A resistência em série  $R_S$  é uma característica das células solares, independente das condições particulares de operação. A partir de todos estes dados, calculam-se os valores de  $V_t$ ,  $v_{oc}$ ,  $r_s$ ,  $FF_0$  e  $FF$ , e com estes a potência máxima  $P_{max}$  do módulo nas condições de temperatura  $T_C$  e radiação solar  $G$  actuais. Também é possível calcular os parâmetros  $a$  e  $b$ , e os valores actuais de  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$  do módulo, bem como a equação I-V para estas condições.

## 5.4 PRODUÇÃO FOTOVOLTAICA MÁXIMA MENSAL E ANUAL

A partir da radiação solar e temperatura em cada instante do dia, definidas mediante os dias característicos mensais das estações indicadas no capítulo 4, e aplicando a metodologia explicada na ponto 5.3.5, pode-se obter a potência máxima produzida em cada estação. Integrando esta produção ao longo do dia, obtém-se a produção fotovoltaica média diária mensal para cada mês do ano e para cada estação. A partir das produções médias diárias mensais, obtém-se a produção média diária anual, tendo em conta o número de dias de cada mês. Dividindo os resultados obtidos pela superfície do módulo, obtém-se a produção por metro quadrado de módulo, que coincide com a produção por metro quadrado de superfície. Deste modo, calcularam-se os resultados que se apresenta na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Estimativa teórica da produção fotovoltaica máxima, média diária mensal e anual - estações do IM, período 2002-2005

	E <sub>max</sub> (Wh/m <sup>2</sup> dia)					
	Funchal	LdeBaixo	PPargo	SJorge	Areiro	PSanto
<b>Janeiro</b>	485	474	471	412	533	468
<b>Fevereiro</b>	578	587	587	509	542	613
<b>Março</b>	771	769	740	680	751	829
<b>Abril</b>	783	837	917	816	853	1003
<b>Mai</b>	940	1006	1096	920	1084	1174
<b>Junho</b>	929	1006	1170	1013	1203	1147
<b>Julho</b>	927	986	1157	950	1275	1139
<b>Agosto</b>	904	970	1047	980	1041	1057
<b>Setembro</b>	830	855	847	808	862	904
<b>Outubro</b>	622	651	649	611	638	680
<b>Novembro</b>	489	497	471	404	431	531
<b>Dezembro</b>	426	440	437	342	395	432
<b>Ano</b>	724	757	799	704	800	831

(unidade: m<sup>2</sup> de superfície horizontal)

Para o cálculo dos valores apresentados na Tabela 5.1, só foram considerados os efeitos da radiação solar e da temperatura do ar na produção fotovoltaica, podendo-se concluir que a produção obtida é uma produção máxima teórica. É sabido que nas instalações em funcionamento normal existem perdas devidas a vários factores, que fazem diminuir o rendimento final. Estas perdas são devidas a:

- Módulos com defeito de fabrico, potência do módulo inferior à potência nominal;

- Módulos com curvas características diferentes, levam a que a potência dos mesmos (quando ligados em série e em paralelo) seja menor que a soma das potências individuais;
- Perdas de potência devido ao envelhecimento dos módulos;
- Distribuição espectral da radiação solar diferente da que existe em condições nominais;
- Reflexão nos vidros quando os raios solares incidem obliquamente no módulo;
- Sujidade nos módulos;
- Sombras provocadas pelos próprios módulos;
- Perdas na cabelagem e diodos dos módulos;
- Perdas no regulador de carga;
- Paragens dos sistemas devido à manutenção e outras causas.

Todas estas perdas são difíceis de contabilizar individualmente, no entanto, podem-se estimar valores médios para as mesmas, que a experiência de funcionamento de instalações bem como vários autores recomendam, (*Progrensa, 2002*), (*Markvart, 1994*) e (*Bravo, et al., 2004*). Assim, estas perdas podem-se considerar constantes em todas as condições de funcionamento do sistema.

A Tabela 5.2 relaciona as perdas que se consideraram neste estudo, em forma de eficiência, ou seja, a perda de cada factor pode obter-se em percentagem, restando de 100 o valor que aparece na coluna seguinte. A Tabela 5.3 mostra as produções fotovoltaicas, tendo em conta todas estas perdas referenciadas.

Tabela 5.2 Perdas de rendimento das instalações fotovoltaicas, expressas em forma de eficiência

Causas de Perdas	Eficiência estimada	Observação
Fabricação	98.5 %	O fabricante indica $\pm 3\%$ de eficiência de potência nos módulos. Consideraremos apenas o limite inferior
Espectral	98.5%	Devido a que o índice de Massa de Ar Relativo (AM) não é standard 1.5
Reflexão	99.0%	Devido a ângulos de incidência altos. Ocorre mais ao amanhecer e anoitecer. Não se considera a utilização de seguidores solares. Devendo garantir-se a incidência perpendicular
Sujidade	97.0%	Sobre os painéis
Ligação em série	98.00%	Devido à ligação do módulos em série. Depende do número de módulos em série
Ligação em paralelo	100.0%	Não consideramos
Sombras	98.5%	
Envelhecimento	97.5%	1% anual. Consideremos um total de 5% ao fim de 5 anos
Disponibilidade do sistema	98.5%	
Cabelagem e díodos	98.5%	Podemos reduzir, aumentando a secção dos condutores
Procura do ponto de máxima potência	98.5%	

Tabela 5.3 Estimativa real da produção fotovoltaica máxima em corrente contínua, média diária mensal e anual - estações do IM, período 2002-2005, (por metro<sup>2</sup> de superfície horizontal)

	Ecc (Wh/m <sup>2</sup> dia)					
	Areeiro	Funchal	LdeBaixo	Ppargo	SJorge	PSanto
<b>Jan</b>	407	397	394	345	446	392
<b>Fev</b>	484	492	492	427	454	514
<b>Mar</b>	646	644	620	570	629	695
<b>Abr</b>	656	701	769	684	715	840
<b>Mai</b>	788	843	918	771	909	984
<b>Jun</b>	778	843	981	849	1008	961
<b>Jul</b>	777	826	969	796	1068	954
<b>Ago</b>	757	813	878	821	872	886
<b>Set</b>	695	717	710	677	723	758
<b>Out</b>	521	545	544	512	535	570
<b>Nov</b>	409	417	395	338	361	445
<b>Dez</b>	357	369	366	286	331	362
<b>Anual</b>	606	634	670	590	671	697

## CAPITULO 6

# OPTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS FOTOVOLTAICOS-EÓLICOS EM SEIS ZONAS CLIMÁTICAS DO ARQUIPÉLAGO DA MADEIRA

---

## **6. OPTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS FOTOVOLTAICOS-EÓLICOS EM SEIS ZONAS CLIMÁTICAS DO ARQUIPÉLAGO DA MADEIRA**

### **6.1 INTRODUÇÃO**

No presente capítulo apresenta-se a última parte do trabalho da tese com o estudo da optimização de sistemas híbridos fotovoltaicos e eólicos em seis locais representativos da diversidade climática do arquipélago da Madeira. Esses locais de estudo correspondem às estações do Instituto de Meteorologia, que foram referidas nos capítulos anteriores. O estudo que se desenvolve aborda tanto aspectos técnicos como económicos: Nesse sentido e ao longo da investigação, pesquisámos diversa bibliografia, da qual destacamos: (*Hoque, et al, 1995*), (*Morgan, et al., 1997*), (*Manolakos, et al., 2001*), (*Koutrulis, et al., 2005*) e (*Kaldellis, et al., 2006*).

Para a elaboração da tese estudou-se em separado os potenciais fotovoltaicos e eólico dos referidos locais, para de seguida se efectuar um estudo conjunto de um sistema híbrido para cada um deles. O potencial fotovoltaico desses locais já foi referido no capítulo 5, e o estudo do potencial eólico é apresentado na primeira parte deste capítulo. Seguidamente, estudam-se os sistemas híbridos, terminando o capítulo com a apresentação dos resultados.

### **6.2 BASE DE DADOS**

A base de dados para o estudo dos sistemas híbridos fotovoltaicos-eólicos é constituída pelos dados diários de radiação solar global, temperatura do ar média e velocidade média do vento, registados nas estações do Instituto de Meteorologia, localizadas no Funchal, Lugar de Baixo, Ponta do Pargo, São Jorge, Areeiro e Porto Santo.

### **6.3 DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA EÓLICO TIPO**

Do mesmo modo que se definiu no capítulo anterior para o estudo do potencial fotovoltaico uma instalação tipo, é necessário definir também as características da *instalação eólica tipo*. Para tal, optámos por um aerogerador de pequena dimensão existente no mercado, adequado

para a utilização num sistema combinado com uma instalação fotovoltaica (Gabriel, et al., 2002). O aerogerador supõe-se colocado em todas as seis estações a uma altura de 23 metros do solo, durante um período de quatro anos, 2002-2005. A curva característica da potência gerada pelo aerogerador, em função da velocidade instântanea do vento, está indicada na Figura 6.1.

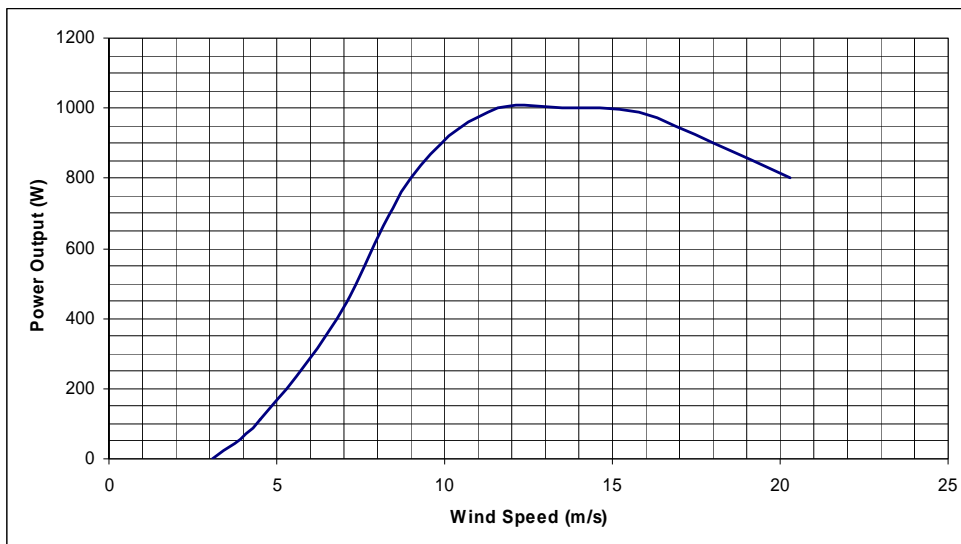


Figura 6.1 Curva de potência do aerogerador em função da velocidade do vento

A turbina eólica seleccionada apresenta as seguintes características técnicas, indicadas pelo fabricante:

Diâmetro do Rótor	2,7 m
Área varrida pelo Rótor	5,726 m <sup>2</sup>
<i>Funcionamento:</i> (Velocidade do vento)	
Para arranque	3,1 m/s
Para atingir a potência nominal	11,6 m/s
Velocidade máxima suportável	até 55 m/s

## 6.4 PRODUÇÃO DO SISTEMA EÓLICO TIPO

### 6.4.1 Determinação das velocidades do vento à altura do aerogerador

Os valores da velocidade do vento nas seis estações meteorológicas foram registados a 10 metros de altura sobre o terreno, altura standard. A Tabela 6.1 indica-nos as velocidades

médias mensais e anuais do vento nas referidas estações, calculadas para o período de quatro anos de estudo.

Tabela 6.1 Velocidades médias do vento -estações do IM, período 2002-2005

	m/s (altura do mastro 10 m)					
	Funchal	LdeBaixo	PPargo	SJorge	Areeiro	PSanto
<b>Janeiro</b>	2.0	1.9	3.1	3.3	5.7	3.5
<b>Fevereiro</b>	2.0	2.2	3.3	3.4	7.6	4.7
<b>Março</b>	1.8	2.2	3.6	3.2	6.2	4.8
<b>Abril</b>	1.7	2.1	3.3	3.1	5.4	4.5
<b>Maió</b>	1.4	2.0	3.1	2.6	6.1	4.8
<b>Junho</b>	1.1	1.7	2.6	2.3	4.1	4.5
<b>Julho</b>	1.1	1.8	2.8	2.1	5.6	4.9
<b>Agosto</b>	1.2	1.8	2.7	2.4	4.4	4.6
<b>Setembro</b>	1.4	1.9	2.9	2.2	5.0	4.2
<b>Outubro</b>	1.7	2.2	3.4	2.9	5.1	4.4
<b>Novembro</b>	1.8	1.9	3.6	3.4	6.5	4.5
<b>Dezembro</b>	2.0	2.2	3.6	3.6	7.6	5.2
<b>Ano</b>	1.6	2.0	3.2	2.9	5.8	4.6

Como o aerogerador seleccionado tem o eixo do rotor a 23 metros de altura do terreno, é necessário estimar a velocidade média diária do vento a essa altura, a partir da velocidade média medida a 10 metros. A variação da velocidade do vento com a altura tende a seguir uma função logarítmica, como a que se indica a seguir, demonstrada em várias literaturas, pelo que a utilizaremos neste estudo:

$$v_z = v_{10} \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(10/z_0)} \quad (6.1)$$

Sendo:

$z$  - Cota (m) no nosso caso  $Z=23\text{m}$

$v_z$  -Velocidade do vento (m/s) à altura  $z$

$v_{10}$  -Velocidade do vento (m/s) à altura de 10 m (altura standard de medição nas estações meteorológicas)

$z_0$  - Constante que depende do terreno (orografia e rugosidade).

No nosso caso vamos considerar o valor de 0,1 de acordo com estudos anteriormente elaborados (*Patel, 1942*) (*Danish Wind Industry Association*). Na sequência da aplicação da equação 6.1, obtiveram-se as velocidades médias estimadas do vento no eixo do aerogerador que se indicam na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 Velocidades médias estimadas do vento - estações do IM - período 2002-2005

	m/s (altura do mastro 23 m)					
	Funchal	LdeBaixo	PPargo	SJorge	Areeiro	PSanto
<b>Janeiro</b>	2.3	2.3	3.7	3.9	6.8	4.1
<b>Fevereiro</b>	2.4	2.6	3.9	4.0	9.0	5.6
<b>Março</b>	2.1	2.6	4.3	3.8	7.3	5.7
<b>Abril</b>	2.0	2.5	3.9	3.7	6.3	5.4
<b>Mai</b>	1.7	2.3	3.6	3.1	7.2	5.7
<b>Junho</b>	1.3	2.0	3.0	2.8	4.8	5.3
<b>Julho</b>	1.3	2.2	3.3	2.5	6.6	5.8
<b>Agosto</b>	1.4	2.1	3.2	2.9	5.2	5.4
<b>Setembro</b>	1.6	2.2	3.5	2.6	5.9	5.0
<b>Outubro</b>	2.0	2.6	4.0	3.4	6.0	5.2
<b>Novembro</b>	2.2	2.3	4.2	4.0	7.7	5.3
<b>Dezembro</b>	2.3	2.6	4.3	4.2	9.0	6.1
<b>Ano</b>	1.9	2.4	3.7	3.4	6.8	5.4

#### 6.4.2 Distribuição de frequências de Weibull

Se dispuséssemos de valores de velocidades instantâneas do vento nas estações, poderíamos obter as potências instantâneas como as indicadas na curva da Figura 6.1. Como só dispomos de velocidades médias diárias (tal como se explicou no ponto anterior), estes valores não se podem utilizar com essa curva, já que se cometeriam erros consideráveis, uma vez que a potência de saída tende a ser proporcional à velocidade do vento elevada ao cubo (*Patel, 1942*) (*Danish Wind Industry Association*). Como é sabido, a média da velocidade é um valor centrado na média de todos os valores, pelo que a velocidade média obtida a partir da média das velocidades cúbicas, dá um valor maior que a média das velocidades. Deste modo, os valores maiores elevados ao cubo têm muito mais peso no cálculo, que valores mais pequenos também elevados ao cubo. Exemplo, o valor médio de  $(10 + 1)$  é 5,5 ao passo que o valor médio de  $(10 + 1)$ , obtido a partir dos seus cubos, é de 7,939, ou seja:  $[(1^3+10^3)/2]^{1/3} \approx 7,939$ .

Assim sendo, há que recorrer a alguns procedimentos para se estimar o valor da energia produzida diariamente pelo aerogerador a partir de um valor único da velocidade média do vento. É necessário para tal, em primeiro lugar, obter a distribuição de frequências de velocidades do vento ao longo do dia, a partir da velocidade média. O conhecimento da lei de distribuição do vento é imprescindível para o aproveitamento da energia eólica. Há muita bibliografia que ratifica a distribuição de frequências do vento em qualquer lugar, podendo-se modelar esta, através da aplicação de uma função probabilística que é a distribuição de Weibull \*, a qual corresponde às seguintes expressões:

Frequência:  $f(v) = k (c)^k \cdot v^{c-1} \cdot \exp(-c v^c)$

Frequência acumulada:  $F(v) = 1 - \exp(-c v^c)$

Sendo:

$v$  - Valor instântaneo da velocidade

$f(v)$  - Frequência com que se produz a velocidade  $v$

$F(v)$  - Frequência acumulada, ou frequência com a que se produzem velocidades  $\leq v$

$k$  - Factor de forma, que varia normalmente entre 1 e 3

$c$  - Factor de escala, que está relacionado com a velocidade média diária  $v_m$  de acordo com a expressão:

$$v_m = c \cdot \Gamma(1 + 1/k)$$

donde  $\Gamma(x)$  é a função gamma.

\* A distribuição de Weibull é um particular da distribuição gamma.

Neste trabalho optou-se por atribuir um valor de 2 ao parâmetro  $k$  de *Weibull*, já que é um valor recomendado pelos fabricantes (*Whisper, 2006*) e associações de energia eólica, e foi o valor utilizado na Madeira em estudos recentemente realizados (*Pereira, et al., 2005*).

### 6.4.3 Produção eólica máxima média diária mensal e anual

Para se calcular a produção eólica o procedimento de cálculo é o seguinte: a partir da velocidade média do dia, obtida da base de dados criada para o efeito, e extrapolada para 23m, altura do mastro do aerogerador, obtém-se a distribuição de frequências de acordo com a função *Weibull*. A distribuição de frequências divide-se em intervalos de velocidades. Com o

valor médio da velocidade do vento de cada intervalo, e utilizando a curva de potência do aerogerador, indicada na Figura 6.1, obtém-se a potência eléctrica gerada. O produto dessa potência pela frequência em que se produzem as velocidades no intervalo correspondente, multiplicado pelas 24 horas do dia, dá-nos a energia gerada durante o período do dia em que o vento sopra com uma velocidade no intervalo das velocidades em estudo. A soma de todas as energias geradas em todos os intervalos de velocidades dá-nos a produção total diária. Para este cálculo utilizam-se os  $n$  intervalos de velocidade ( $j=1, \dots, n$ ) ao longo do dia, tendo em conta que a turbina gera energia numa só margem de valores da velocidade do vento, compreendida entre a velocidade de arranque (ou velocidade mínima de operação) e a velocidade de corte ou (velocidade máxima de operação), que para o nosso caso específico é de 3 m/s e 20 m/s, respectivamente.

Desta forma, obteve-se a produção electro-eólica estimada para todos os dias relativos ao período de 2002 a 2005 nas seis estações estudadas, e a partir destas, as produções médias diárias e anual para cada um dos doze meses do ano. A Tabela 6.3 apresenta os valores obtidos para o aerogerador seleccionado, e a Tabela 6.4 apresenta a produção por metro quadrado de área de varrimento do rotor do aerogerador.

Tabela 6.3 Estimativa da produção do aerogerador, média diária mensal e anual, estações do IM, período 2002-2005 [aerogerador: 1000 W]

	<b>E<sub>max</sub> (Wh/dia)</b>					
	<b>Funchal</b>	<b>L.deBaixo</b>	<b>P.Pargo</b>	<b>S.Jorge</b>	<b>Areiro</b>	<b>P. Santo</b>
<b>Janeiro</b>	849	706	2735	3260	7070	3955
<b>Fevereiro</b>	909	1120	3268	3518	9450	6912
<b>Março</b>	627	1268	3894	3212	7782	7171
<b>Abril</b>	468	997	3034	3058	6617	6568
<b>Maió</b>	214	758	2642	1927	7559	7220
<b>Junho</b>	10	364	1522	1450	4639	6480
<b>Julho</b>	49	564	1939	933	6843	7423
<b>Agosto</b>	40	515	1791	1722	5115	6581
<b>Setembro</b>	168	688	2371	1153	6011	5725
<b>Outubro</b>	557	1156	3522	2514	5887	6089
<b>Novembro</b>	568	713	3865	3520	7752	6349
<b>Dezembro</b>	828	1317	3956	3891	8934	8064
<b>Ano</b>	<b>439</b>	<b>847</b>	<b>2877</b>	<b>2508</b>	<b>6961</b>	<b>6545</b>

Tabela 6.4 Estimativa da produção do aerogerador, média diária mensal e anual, estações do IM, período 2002-2005, (por metro<sup>2</sup> de superfície varrida pelo rotor do gerador)

	E <sub>max</sub> (Wh/m <sup>2</sup> rotor dia)					
	Funchal	L.deBaixo	P.Pargo	S.Jorge	Areeiro	P.Santo
<b>Janeiro</b>	148	123	478	569	1235	691
<b>Fevereiro</b>	159	196	571	614	1650	1207
<b>Março</b>	110	221	680	561	1359	1252
<b>Abril</b>	82	174	530	534	1156	1147
<b>Maió</b>	37	132	461	337	1320	1261
<b>Junho</b>	2	64	266	253	810	1132
<b>Julho</b>	9	98	339	163	1195	1296
<b>Agosto</b>	7	90	313	301	893	1149
<b>Setembro</b>	29	120	414	201	1050	1000
<b>Outubro</b>	97	202	615	439	1028	1063
<b>Novembro</b>	99	125	675	615	1354	1109
<b>Dezembro</b>	145	230	691	680	1560	1408
<b>Ano</b>	<b>77</b>	<b>148</b>	<b>503</b>	<b>438</b>	<b>1216</b>	<b>1143</b>

Para que estes resultados se possam comparar e combinar com os resultados obtidos da produção solar fotovoltaica indicada no capítulo 5, as produções médias diárias do aerogerador têm que ser divididas por metros quadrados de terreno que ocupa cada aerogerador, supondo existirem mais aerogeradores similares ao redor. A colocação dos aerogeradores dentro de um parque eólico tem de ser efectuada de modo criterioso. Tanto os fabricantes (*Whisper, 2006*), como as referências bibliográficas (*Patel, 1942*)(*Castro, 2004*) recomendam uma separação mínima entre os aerogeradores em função do seu tamanho, de 5 a 9 vezes o diâmetro do rotor na direcção predominante do vento, e de 3 a 5 vezes na direcção perpendicular.

Mesmo tomando estas medidas, a experiência mostra que a energia perdida devido ao efeito de esteira é de cerca de 5 %. (*Castro, 2004*). No nosso caso, como temos um rotor com 2,7 metros de diâmetro, a área de terreno ocupada por cada aerogerador será de  $(2,7 \times 5) \times (2,7 \times 3) = 109,35 \text{ m}^2$ . Dividindo as produções médias diárias do aerogerador pelos metros quadrados de terreno afectado, obtemos as produções por metro quadrado de terreno, que aparecem na Tabela 6.5

Tabela 6.5 Estimativa da produção do aerogerador, médias diárias mensal e anual, estações do IM, período 2002-2005 (por metro<sup>2</sup> de superfície de terreno)

	Emax (Wh/m <sup>2</sup> terreno. dia)					
	Funchal	L.deBaixo	P.Pargo	S.Jorge	Areeiro	P.Santo
<b>Janeiro</b>	8	6	25	30	65	36
<b>Fevereiro</b>	8	10	30	32	86	63
<b>Março</b>	6	12	36	29	71	66
<b>Abril</b>	4	9	28	28	61	60
<b>Maió</b>	2	7	24	18	69	66
<b>Junho</b>	0,1	3	14	13	42	59
<b>Julho</b>	0,4	5	18	9	63	68
<b>Agosto</b>	0,4	5	16	16	47	60
<b>Setembro</b>	2	6	22	11	55	52
<b>Outubro</b>	5	11	32	23	54	56
<b>Novembro</b>	5	7	35	32	71	58
<b>Dezembro</b>	8	12	36	36	82	74
<b>Ano</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>26</b>	<b>23</b>	<b>64</b>	<b>60</b>

## 6.5 OPTIMIZAÇÃO TÉCNICA DOS SISTEMAS HÍBRIDOS FOTOVOLTAICOS EÓLICOS NÃO CONECTADOS À REDE ELÉCTRICA

### 6.5.1 Definição do sistema híbrido tipo. Hipóteses

O sistema híbrido que vamos considerar no estudo, para fazer a simulação de funcionamento, é um sistema constituído por três sub-sistemas a saber: um sub-sistema fotovoltaico com as características descritas no capítulo 5; um sub-sistema eólico com características descritas na secção anterior, e ainda, um sub-sistema de armazenamento de energia, constituído por um banco de baterias (*Beyer, et al., 1996*). Este último sub-sistema deverá ter capacidade de armazenamento suficiente para cobrir uma procura de energia com valor determinado (*Rodrigues, 1977*). Admite-se também a existência dum gerador auxiliar de apoio (por exemplo, a gasóleo) para repor a eventual falta de energia quando a produção conjunta do sistema híbrido não seja suficiente para cobrir a procura (*Rodrigues, et al., 2003*) (*Bravo, et al., 2004*).

Como o objectivo deste capítulo e da própria tese é: otimizar a proporção de cobertura da procura energética, que corresponde a cada um dos sub-sistemas fotovoltaico e eólico, em cada um dos locais de estudo, e como os resultados que se obterão são dependentes dos aspectos relacionados tanto com a produção eléctrica como com a procura, e também da interacção entre elas ao longo do tempo, é conveniente estudar e equacionar várias hipóteses para que os resultados sejam os mais gerais possíveis e, desta forma, se poder comparar objectivamente as diferentes zonas climáticas, (Beyer, et al., 1996), (Markvart, 1996) e (Yang, et al., 2006).

Com este objectivo admitem-se as seguintes hipóteses:

- i. A procura diária de electricidade é constante em todo o período;
- ii. A procura diária de electricidade é constante, independentemente da proporção em que se considerem as componentes electro-produtoras fotovoltaico e eólico do sistema híbrido em cada simulação;
- iii. A procura diária de electricidade é específica em cada local de estudo, e igual à média da produção diária, considerando o período de quatro anos de estudo, do sistema fotovoltaico e eólico;
- iv. A capacidade de armazenamento do banco de baterias é suficiente para 3 dias de consumo admitindo não haver perdas por auto-descarga.

A hipótese de se admitir que o consumo de energia é constante é bastante realista na maioria dos casos. Por outro lado, consideram-se as baterias isentas de perdas para não se introduzir outra variável no estudo como é a curva do consumo diário.

Para se poder satisfazer as hipóteses i), ii) e iii), a dimensão do sub-sistema eólico, quando o sistema híbrido é constituído por **100 % eólico e 0 % fotovoltaico**, há que ser tal que a sua produção média diária anual deva ser igual à produção média diária anual do sub-sistema fotovoltaico, quando o sistema híbrido é composto por **100 % fotovoltaico e 0 % de eólico**.

A partir destes casos extremos, qualquer caso geral de composição do sistema híbrido seria constituído por uma percentagem do sistema todo-solar (**100 % fotovoltaico**), e uma percentagem, complementar do anterior até alcançar os 100 %, do sistema todo-eólico (**100 % eólico**). Desta forma garante-se que para qualquer proporção eólica/fotovoltaica no sistema

híbrido em cada local de estudo, a sua produção média diária anual é sempre a mesma e, portanto, a procura diária também é sempre a mesma.

### **6.5.2 Produção máxima e comparativa dos sistemas todo-solar (100 % fotovoltaico) e todo-eólico (100 % eólico)**

Uma vantagem que se obtêm ao relacionar a procura energética à produção anual do sistema híbrido, é que para se elaborar um estudo não é necessário fazer a simulação com os sub-sistemas em tamanhos reais, mas somente ser necessário conhecer qual a proporção exacta de cada um dos sistemas. Os resultados obtidos em valores percentuais são, portanto, extrapoláveis a qualquer dimensão. Uma consequência importante para a simplificação do estudo é que as potências (instaladas) dos sub-sistemas fotovoltaico e eólico podem-se fornecer em metros quadrados de terreno (tal como ficou estabelecido na secção anterior para a parte eólica, e no capítulo 5 para a fotovoltaica) e que se podem variar livremente os metros quadrados para se efectuar a simulação do sistema que se pretende. A fim de facilitar a compreensão desta metodologia, abordaremos, em primeiro lugar, antes do caso geral, a comparação entre um sistema todo-solar (**100 % fotovoltaico**) e um sistema todo-eólico (**100 % eólico**).

Na Tabela 6.6 resume-se os resultados da produção máxima de energia, valor da média diária anual, referido a metro quadrado de terreno, que se obtiveram para as 6 estações no arquipélago, utilizando uma instalação **100 % fotovoltaica**, com os módulos colocados no plano horizontal, e uma instalação **100% eólica**, com o aerogerador situado a 23 metros do solo. Os valores que se apresentam na Tabela 6.6 variam ligeiramente dos valores apresentados nas Tabelas 5.1 e 6.5. Esta pequena diferença deve-se ao facto de que na simulação dos sistemas híbridos só se tiveram em consideração os dias do período 2002-2005 em que existiam simultaneamente dados de radiação solar, temperatura do ar e vento, ao passo que na elaboração da Tabela 5.1 consideraram-se apenas os dias com dados de radiação e temperatura, e para a Tabela 6.6 usaram-se só os dias com dados de vento.

A partir dos valores indicados na Tabela 6.6 podem-se obter facilmente os metros quadrados de terreno associados a um aerogerador que, no período de quatro anos, e para cada uma das 6 estações, produziria a mesma quantidade de energia que um metro quadrado de módulo fotovoltaico, bastando para tal, dividir o valor da energia fotovoltaica pelo valor eólico

indicado nas células, considerando sempre o módulo colocado num plano horizontal e o aerogerador situado a 23 m de altura (Tabela 6.7). Na Tabela 6.7 apresenta-se novamente a produção média diária anual destes sistemas que, de acordo com as hipóteses do ponto anterior, fazemo-las coincidir com a procura diária do consumo.

Tabela 6.6 Produção de energia, máxima média diária anual - instalação (100 % fotovoltaica), e instalação (100 % eólica), em 6 locais de estudo (por metro<sup>2</sup> de superfície de terreno)

	<b>E<sub>max</sub> (Wh/m<sup>2</sup> terreno.dia)</b>					
	<b>Funchal</b>	<b>L.deBaixo</b>	<b>P.Pargo</b>	<b>S.Jorge</b>	<b>Areiro</b>	<b>P.Santo</b>
<b>Fotovoltaica</b>	722	763	815	718	813	833
<b>Eólica</b>	4,00	7,74	26,30	22,93	63,66	59,88

Com os módulos colocados no plano horizontal e aerogerador a 23 m de altura

Tabela 6.7 Metros quadrados de terreno afecto ao Aerogerador sobre o terreno que produzem a mesma energia anual que um metro quadrado de gerador fotovoltaico, nos locais de estudo. Na primeira fila aparece a produção média diária anual

	<b>Funchal</b>	<b>L.deBaixo</b>	<b>P.Pargo</b>	<b>S.Jorge</b>	<b>Areiro</b>	<b>PSanto</b>
Produção média diária = procura Wh/m <sup>2</sup> .dia	722	763	815	718	813	833
m <sup>2</sup> de terreno Sistema Fotovoltaico	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
m <sup>2</sup> de terreno Sistema Eólico	180,035	98,550	30,981	31,304	12,769	13,911

Com os módulos colocados no plano horizontal e aerogerador colocado a 23 m de altura

Se tivermos em conta que o aerogerador que se utilizou como referência, tem uma área de varrimento de 5,726 m<sup>2</sup>, e que a sua superfície de terreno de afectação se estimou em 109,35 metros quadrados, podemos obter a área de rotor que produz ao longo de um ano a mesma energia que um metro quadrado de módulo fotovoltaico, colocado na horizontal, bastando dividir o valor indicado na última linha da Tabela 6.7 por 109,35 e, seguidamente, multiplicar por 5,726. A partir da área obtém-se o diâmetro do rotor (Tabela 6.8).

Tabela 6.8 Metros quadrados e diâmetro de rotor de Aerogerador sobre o terreno, que produz ao fim de um ano a mesma energia que um metro quadrado de módulo fotovoltaico

	<b>Funchal</b>	<b>L.deBaixo</b>	<b>PPargo</b>	<b>SJorge</b>	<b>Areiro</b>	<b>PSanto</b>
Produção média diária = procura diária Wh/m <sup>2</sup> .dia	722	763	815	718	813	833
m <sup>2</sup> de módulo fotovoltaico horizontal	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
m <sup>2</sup> de área varrida pelo rotor do aerogerador	9,42	5,16	1,62	1,63	0,66	0,72
Diâmetro de rotor do aerogerador	3,46	2,56	1,43	1,44	0,92	0,96

Com os módulos colocados no plano horizontal e altura do aerogerador a 23 m  
Na primeira fila está indicada a produção média máxima

### 6.5.3 Operação e balanço energético do sistema híbrido fotovoltaico-eólico

Nas Tabelas 6.6 a 6.8 apresentamos a produção máxima de energia que poderia fornecer um **Sistema 100 % fotovoltaico** ou um **Sistema 100 % eólico**. Estas produções máximas são as que se obteriam se não houvesse perdas devido ao desfasamento diário entre a produção e a procura. Seriam, na realidade, as produções médias diárias de sistemas conectados à rede eléctrica, os quais injectam nesta toda a energia produzida. Entretanto, o que estudámos foram sistemas autónomos e isolados da rede, os quais requerem baterias de armazenamento e sistemas auxiliares de apoio para reposição de energia, quando a produção híbrida é menor que a procura, e as baterias estão descarregadas. Na Figura 6.2 apresenta-se um esquema de um sistema híbrido.

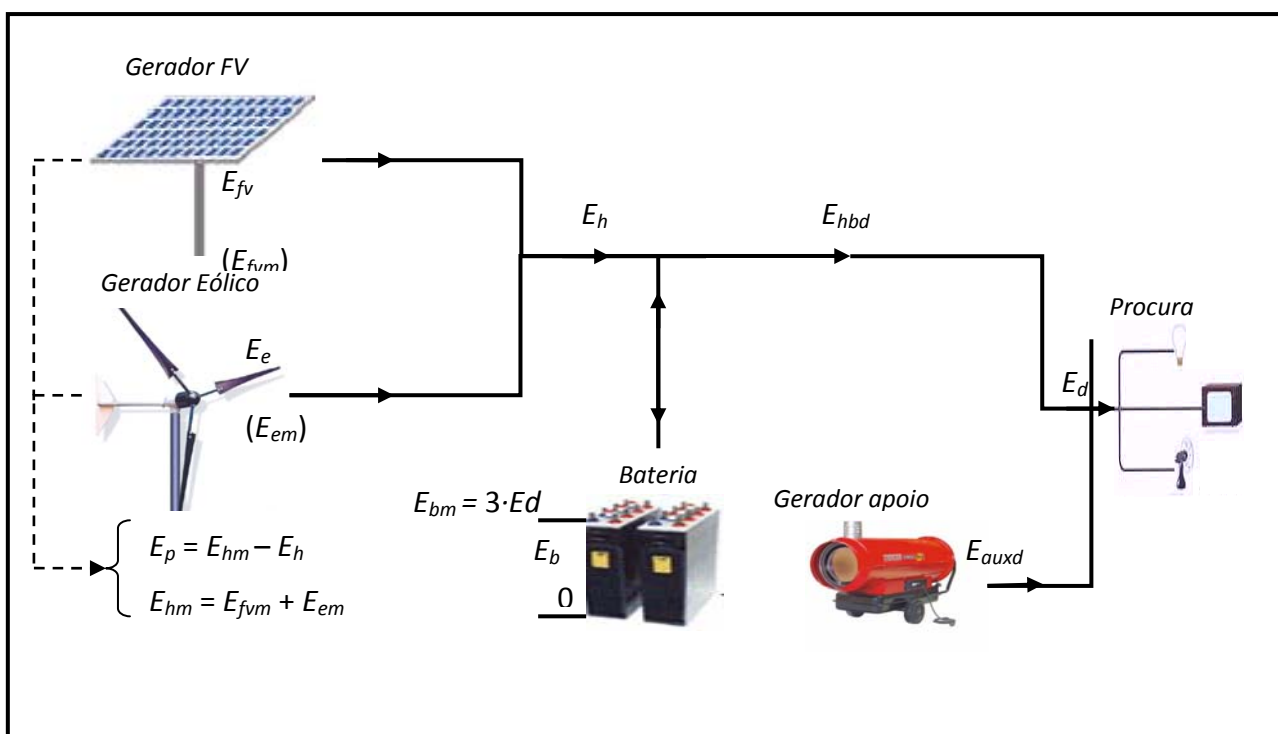


Figura 6.2 Esquema dum sistema híbrido fotovoltaico-eólico

A nomenclatura é a seguinte, referida a um dia  $i$  determinado:

$E_{em}$	Energia eléctrica máxima produzida pelo sub-sistema eólico
$E_{fvm}$	Energia eléctrica máxima produzida pelo o sub-sistema fotovoltaico
$E_{hm}$	Energia eléctrica máxima produzida pelo sistema híbrido (FV-E)
$E_{bm}$	Energia máxima que a bateria pode armazenar
$E_e$	Energia eléctrica efectiva que produz o sub-sistema eólico
$E_{fv}$	Energia eléctrica efectiva que produz o sub-sistema fotovoltaico

$E_h$	Energia eléctrica efectiva que produz o sistema híbrido (FV-E)
$E_{b(i)}$	Energia efectiva armazenada na bateria ao começo do dia $i$
$E_{b(i+1)}$	Energia efectiva armazenada na bateria ao fim do dia $i$ e começo do dia $i+1$
$E_{hbd}$	Energia efectiva destinada à procura pelo sistema híbrido (FV-E) pela bateria
$E_{auxd}$	Energia produzida pelo sistema auxiliar para repor a falta de energia diária
$E_d$	Energia eléctrica consumida diariamente
$E_p$	Energia eléctrica perdida ou deixada de produzir pelo sistema híbrido (fotovoltaico-eólico)

Podemos estabelecer as seguintes relações:

$$E_{hm} = E_{em} + E_{fvm}$$

$$E_h = E_e + E_{fv}$$

$$E_p = E_{hm} - E_h$$

$$E_{bm} = 3 \cdot E_d$$

$$E_d = E_{hbd} + E_{auxd}$$

Além do mais, e de acordo com as hipóteses estabelecidas, a energia diária (procura),  $E_d$ , é constante e igual à média diária das energias máximas que poderia produzir o sistema híbrido eólico-fotovoltaico no período dos quatro anos em estudo:

$$E_d = \frac{\sum_1^n E_{hm}}{n}$$

Na expressão,  $n$  é o número de dias do período de quatro anos

O modo de operar a instalação, e portanto, a simulação a que se submete o sistema para optimizá-lo, divide-se em dois casos e quatro sub-casos, em função da relação entre os diferentes fluxos energéticos intervenientes, para um dia  $i$  determinado:

Caso 1.  $E_{hm} \geq E_d$

Neste caso   maior a produção de energia que se pode obter do sistema híbrido que a procura. Podemos deduzir, portanto, que nesse dia cobre-se a procura com energia do sistema híbrido, e não se necessita do sistema auxiliar:

$$E_{auxd} = 0$$

$$E_{hbd} = E_d$$

Podemos ainda distinguir dois sub-casos

Sub-caso 1.1.  $(E_{hm} - E_d) \leq (E_{bm} - E_b)$

Neste sub-caso, o sistema híbrido produz a energia máxima possível, sendo parte dela utilizada no consumo e o restante destinado ao armazenamento na bateria:

$$E_h = E_{hm}$$

$$E_p = 0$$

$$E_{b(i+1)} = E_{b(i)} + (E_{hm} - E_d)$$

Subcaso 1.2.  $(E_{hm} - E_d) > (E_{bm} - E_b)$

Neste sub-caso, o sistema híbrido não pode produzir a energia máxima possível, sendo a energia produzida destinada ao consumo e a carregar completamente a bateria:

$$E_h < E_{hm}$$

$$E_p = E_{hm} - E_h$$

$$E_{b(i+1)} = E_{b(i)} + (E_h - E_d) = E_{bm}$$

Caso 2.  $E_{hm} < E_d$

Neste caso a produção do sistema híbrido é menor que a procura. Podemos deduzir, portanto, que nesse dia o sistema híbrido produz toda a energia possível e que não há perdas:

$$E_h = E_{hm}$$

$$E_p = 0$$

Podemos distinguir também dois sub-casos

Subcaso 2.1  $E_b \geq (E_d - E_{hm})$

Neste sub-caso, a procura cobre-se completamente entre a produção híbrida e o contributo da bateria:

$$E_{hbd} = E_d$$

$$E_{auxd} = 0$$

$$E_{b(i+1)} = E_{b(i)} - (E_d - E_{hm})$$

Sub-caso 2.2  $E_b < (E_d - E_{hm})$

Neste sub-caso, o contributo de energia do sistema híbrido mais a bateria não são suficientes para satisfazer a procura, tem-se que recorrer ao sistema auxiliar de apoio para cobrir a diferença:

$$E_{auxd} > 0$$

$$E_d = E_{hbd} + E_{auxd}$$

$$E_{hbd} = E_{hm} + E_{b(i)}$$

$$E_{b(i+1)} = E_{b(i)} - E_{b(i)} = 0$$

Da análise comparativa dos resultados da produção energética das diferentes composições percentuais FV-E dos sistemas híbridos, pode-se determinar facilmente o índice ou grau de cobertura com energia renovável do sistema. Define-se este grau de cobertura renovável como

a percentagem de energia consumida na procura proveniente do sistema híbrido FV-E num período de tempo considerado. Como no presente estudo, o período de tempo considerado foi de quatro anos, de 2002 a 2005, o grau de cobertura renovável, designado por  $C$ , pode ser obtido através da divisão da soma de todas as energias diárias relativas à procura, produzidas pelo sistema híbrido,  $\sum E_{hbd}$ , pela soma de todas as energias consumidas nesse período,  $\sum E_d$ .

Se assumirmos que o armazenamento na bateria é o mesmo ao início e ao final do estudo ao longo do referido período (ainda que isto não seja assim tem pouca influência no balanço energético para um largo período de quatro anos), a energia  $\sum E_{hbd}$  referente à procura coincide com a energia produzida pelo sistema híbrido FV-E nesse período,  $\sum E_h$ .

$$C = \frac{\sum_1^n E_{hbd}}{\sum_1^n E_d} \cdot 100 = \frac{\sum_1^n E_h}{\sum_1^n E_d} \cdot 100$$

A percentagem de energia necessária ao consumo que não poder ser coberta pelas energias renováveis é produzida pelo sistema auxiliar de apoio:

$$100 - C = \frac{\sum_1^n E_{auxd}}{\sum_1^n E_d} \cdot 100$$

Como de acordo com as hipóteses admitidas, a energia diária (procura),  $E_d$ , é constante e igual à média diária das energias máximas que poderia produzir o sistema híbrido FV-E no período dos quatro anos em estudo, temos:

$$E_d = \frac{\sum_1^n E_{hm}}{n}$$

$$\sum_1^n E_d = n \cdot E_d = \sum_1^n E_{hm}$$

Podemos assim obter também a cobertura renovável da procura, bastando dividir a energia renovável efectivamente produzida, pela máxima que se poderia ter produzido.

$$C = \frac{\sum_1^n E_h}{\sum_1^n E_{hm}} \cdot 100$$

Ao mesmo tempo, podemos calcular a energia perdida, ou não aproveitada, no período dos quatro anos, através da soma das diferenças diárias entre as energias renováveis máximas que

se poderiam produzir e as que efectivamente foram produzidas, que venham coincidindo com as energias fornecidas pelo sistema auxiliar nesse período de tempo.

$$\sum_1^n E_p = \sum_1^n E_{hm} - \sum_1^n E_h = \sum_1^n E_d - \sum_1^n E_{hbd} = \sum_1^n E_{auxd}$$

#### 6.5.4 Evolução temporal dos fluxos energéticos

Já se referiu anteriormente que, com as hipóteses introduzidas, não é necessário considerar modelos concretos de módulos fotovoltaicos e aerogeradores na simulação (salvo no que respeita às características e rendimentos dos mesmos), mas apenas estabelecer relações de potências entre eles, ou relações de metros quadrados equivalentes. Por exemplo, na Tabela 6.8 deste capítulo podemos ver que, no caso de Funchal, um m<sup>2</sup> de módulo fotovoltaico colocado horizontalmente produz ao longo de um período de quatro anos, uma quantidade de energia média máxima de 722 Wh/m<sup>2</sup>.dia, igual ao que produziria um aerogerador com 9,427 m<sup>2</sup> de área de varrimento do rotor e colocado a uma altura de 23 m.

Se admitirmos que um *Sistema todo-solar (100% fotovoltaico)* é constituído por 1 m<sup>2</sup> de módulo, o *Sistema todo-eólico (100% eólico)* deve ser constituído por um aerogerador com 9,427 m<sup>2</sup> de área de varrimento de rotor e, em ambos os casos, a procura média diária de energia deve coincidir com a média diária das produções máximas e, portanto, será de 722 Wh/m<sup>2</sup>.dia.

Qualquer combinação que queiramos estudar do sistema híbrido deve ser constituída em termos percentuais complementares a 100 dos sistemas anteriores. Assim, por exemplo, um *Sistema Híbrido (50% fotovoltaico e 50% eólico)* seria constituído por (1 m<sup>2</sup>/2) = 0,5 m<sup>2</sup> de módulo **FV** e (9,427 m<sup>2</sup>/2) = 4,7135 m<sup>2</sup> de área de varrimento do rotor. Este sistema híbrido produziria em média diária um máximo idêntico aos sistemas **100% eólico** e **100% fotovoltaico**, de 722 Wh/m<sup>2</sup>.dia, que seria também o valor da procura diária. Para qualquer outra combinação, a percentagem que aumenta/reduz o sub-sistema fotovoltaico tem que ser idêntica à percentagem que reduz/aumenta o sub-sistema eólico.

Por outro lado, os resultados da simulação que se obtêm com essas quantidades são idênticos aos que se obteriam com um sistema **100% fotovoltaico** de (1 m<sup>2</sup> x 2) = 2 m<sup>2</sup>, se o sistema

**100% eólico** tivesse  $(9,427 \text{ m}^2 \times 2) = 18,854 \text{ m}^2$  de área de varrimento do rotor, pelo que a produção máxima média diária seria de  $(722 \text{ m}^2 \times 2) = 1444 \text{ Wh/m}^2\text{.dia}$ , que deveria ser também a procura média diária de energia a considerar.

No nosso caso, vamos fazer simulações considerando  $1 \text{ m}^2$  de módulo fotovoltaico para a instalação todo-solar **100% fotovoltaico** e, para a instalação todo-eólico **100% eólica**, sendo as áreas varridas pelo rotor escolhidas em função do local de estudo e de acordo com a Tabela 6.8. Por exemplo, a instalação do Funchal seria de  $1 \text{ m}^2$  de módulo fotovoltaico para **100% fotovoltaico** e de  $9,427 \text{ m}^2$  de área varrida pelo rotor para instalação **100% eólica**.

A produção máxima média diária seria de  $722 \text{ Wh/m}^2\text{.dia}$  para qualquer combinação FV-E, a procura diária constante,  $E_d$ , também de  $722 \text{ Wh/m}^2\text{.dia}$ , e a capacidade máxima de armazenamento da bateria de  $3 \times 722 \text{ Wh/m}^2\text{.dia} = 2.166 \text{ Wh/m}^2\text{.dia}$ .

Aplicando as relações referidas no ponto 6.5.3 às produções máximas diárias de energia fotovoltaica obtidas no capítulo anterior, e às produções máximas diárias eólicas do ponto 6.4, obtêm-se os balanços energéticos, bem como a evolução dos fluxos de energia. Como exemplo, mostra-se na Figura 6.3 a evolução dos fluxos de energia no Funchal relativos ao período de 1/09/2002 a 31/10/2002. Na Figura 6.4 mostra-se o estado de carga da bateria para o mesmo período de tempo.

Analisando as Figuras 6.3 e 6.4 podemos verificar que em apenas 1,5 % dos dias houve desperdício de energia. O armazenamento diário da carga nas baterias garantiu 21 % dos dias com 100 % de carga e 38 % dois dias com meia carga. O gerador de apoio funcionou durante 43% dos dias para repor a energia necessária.

### **6.5.5 Resultados da optimização técnica**

A Tabela 6.9 e a Figura 6.5 mostram a percentagem de cobertura da procura que se obtêm com energias renováveis de origem solar e eólica nas instalações híbridas, localizadas nos seis locais de estudo. A Tabela 6.10 mostra a percentagem fotovoltaico-eólica que oferecem as melhores opções técnicas de cobertura com energias renováveis.

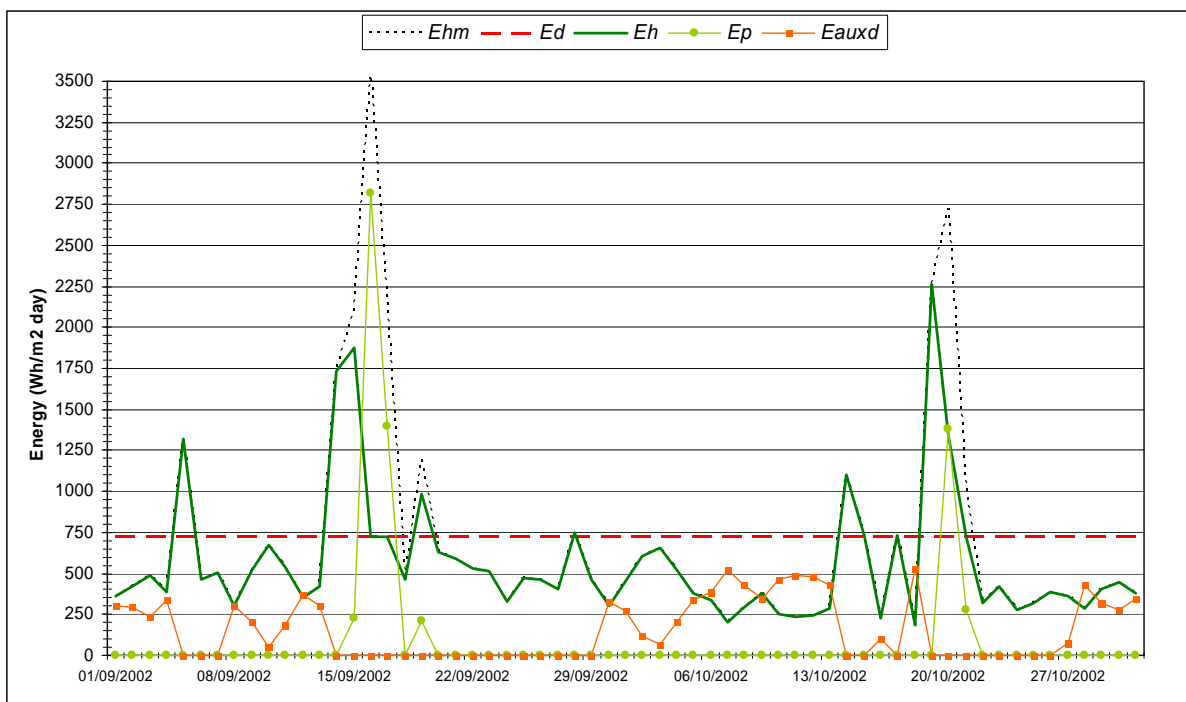


Figura 6.3 Evolução da produção de energia na estação do Funchal no período 1/09/2002 a 31/10/2002

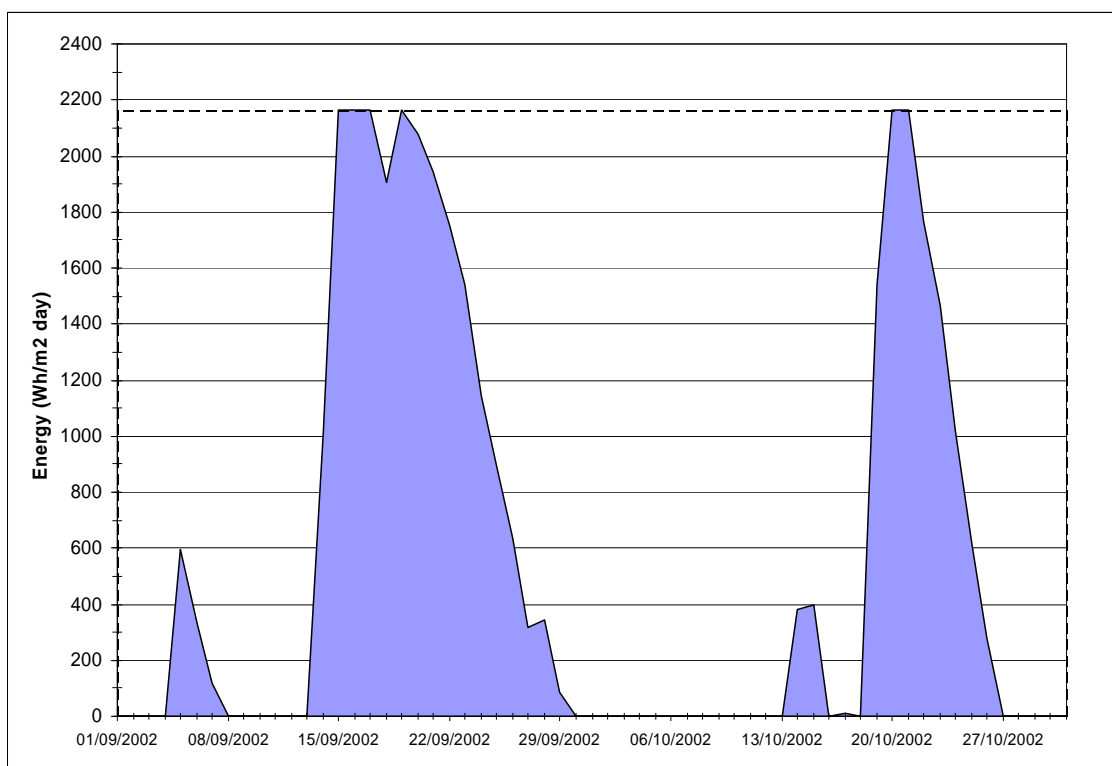


Figura 6.4 Evolução do estado de carga da bateria na estação do Funchal no período 1/09/2002 a 31/10/2002

Tabela 6.9 Percentagem de cobertura fotovoltaica-eólica nos sistemas híbridos, para 6 estações

%Solar	Funchal	LdeBaixo	PPargo	SJorge	Areiro	PSanto	%Eólico
<b>0</b>	46.2%	68.4%	78.4%	70.8%	85.8%	90.7%	<b>100</b>
<b>10</b>	52.9%	72.6%	81.9%	75.0%	88.3%	91.8%	<b>90</b>
<b>20</b>	59.4%	76.6%	85.2%	79.1%	90.3%	92.5%	<b>80</b>
<b>30</b>	65.8%	80.4%	88.2%	83.0%	92.0%	93.0%	<b>70</b>
<b>40</b>	71.9%	84.0%	90.8%	86.6%	93.0%	92.7%	<b>60</b>
<b>50</b>	78.0%	87.2%	92.7%	89.7%	92.8%	91.8%	<b>50</b>
<b>60</b>	83.7%	89.7%	93.2%	91.8%	91.5%	90.7%	<b>40</b>
<b>70</b>	88.9%	91.3%	92.3%	92.1%	89.7%	89.5%	<b>30</b>
<b>80</b>	92.6%	91.4%	90.5%	90.9%	87.7%	88.3%	<b>20</b>
<b>90</b>	92.1%	90.1%	88.3%	88.4%	85.7%	87.1%	<b>10</b>
<b>100</b>	88.7%	88.2%	85.8%	85.6%	83.3%	85.8%	<b>0</b>

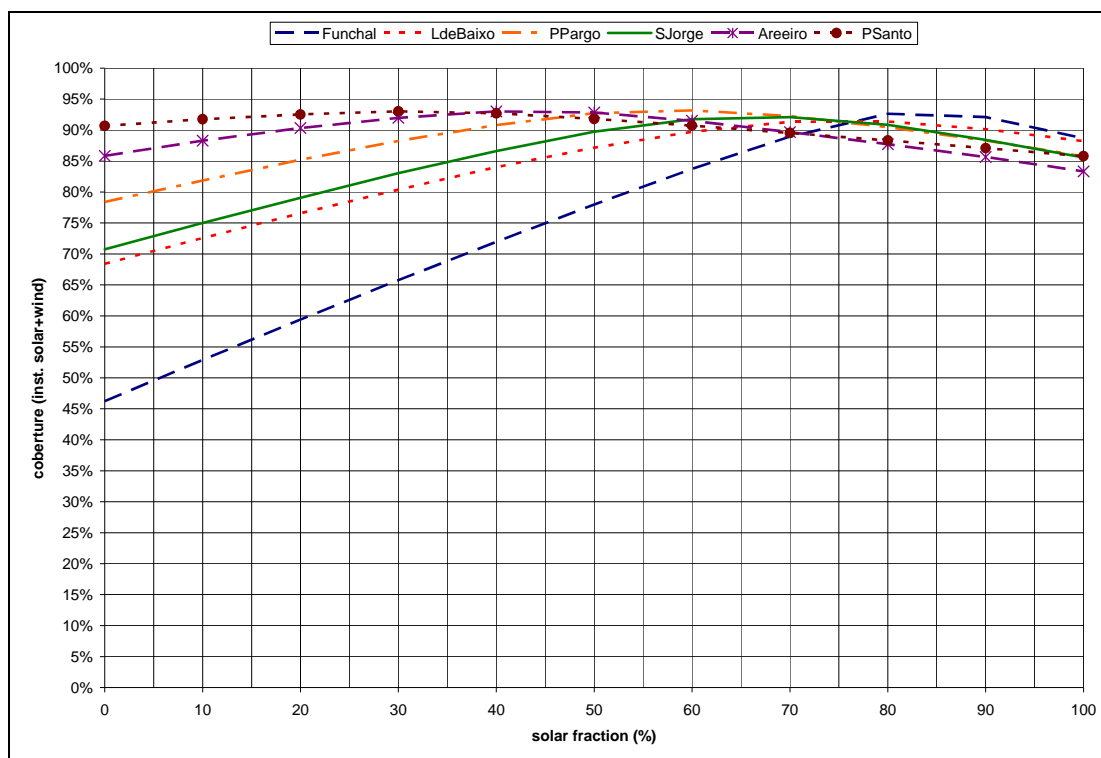


Figura 6.5 Percentagem da cobertura dos sistemas fotovoltaico-eólico, nas seis estações

Tabela 6.10 Percentagens fotovoltaica-eólica e valor de taxa de cobertura que proporcionam as melhores opções técnicas

	Funchal	LdeBaixo	PPargo	SJorge	Areiro	PSanto
<b>% Fotovoltaica</b>	83	74	59	66	44	31
<b>% Eólica</b>	17	26	41	34	56	69
<b>% de cobertura</b>	<b>92.91</b>	<b>91.52</b>	<b>93.19</b>	<b>92.21</b>	<b>93.20</b>	<b>93.20</b>

Na Tabela 6.10 pode-se observar que, em todas as estações, a percentagem óptima da produção de energia a partir de sistemas híbridos FV-E é muito alta, superior a 90 % e dentro de uma margem estreita de 91,5% a 93,2%. Verifica-se que só é necessário recorrer a energias convencionais entre 6,8 % a 8,5% do consumo. Estes valores altos da taxa de cobertura com energias renováveis obtêm-se com percentagens díspares FV-E, dependendo do local. Assim, verifica-se que nas faixas costeiras da ilha de Madeira, o óptimo obtêm-se com maior proporção de fotovoltaica, sendo isto mais acentuado na costa sul do que na costa norte. Pelo contrário, nos lugares de maior altitude na ilha da Madeira e na ilha de Porto Santo, o óptimo obtêm-se com maior proporção de eólica.

Outra conclusão que se pode obter da Tabela 6.9 e Figura 6.5 é que, se nos afastarmos do ponto óptimo, nas zonas costeiras da ilha de Madeira, diminui-se mais acentuadamente a cobertura renovável ao incrementar a percentagem eólica do que ao incrementar a percentagem fotovoltaica. Por outro lado, nas zonas altas da ilha de Madeira e na ilha de Porto Santo, as diminuições da cobertura pela variação da percentagem eólico/solar são mais suaves e similares em ambas as variações.

Analisando os resultados anteriores, e tendo em conta que uma instalação híbrida eólica/fotovoltaica é mais complexa que uma instalação apenas fotovoltaica, pode ser de interesse calcular a área necessária para acrescentar a uma *Instalação toda-solar (100 % fotovoltaica)* para que proporcione uma cobertura da procura de energias renováveis idêntica ao óptimo do sistema híbrido.

Fazendo a simulação correspondente, obtêm-se os resultados que aparecem na Tabela 6.11, donde se mostra a percentagem (maior de 100) do *Sistema todo-fotovoltaico* que permitiria proporcionar o mesmo grau óptimo de cobertura da procura de renováveis que o *Sistema híbrido*. Deve-se ter em atenção, que com esta solução as perdas energéticas são maiores que com o sistema híbrido.

Tabela 6.11 Percentagem dum *Sistema todo-solar* com o mesmo grau de cobertura do consumo que um *Sistema híbrido*.

		Funchal	LdeBaixo	PPargo	SJorge	Areeiro	PSanto
<b>Sistema híbrido</b>	<b>% Fotovoltaica</b>	83	74	59	66	44	31
<b>fotovoltaico-eólico</b>	<b>% Eólica</b>	17	26	41	34	56	69
<b>Sistema todo-solar</b>	<b>% Fotovoltaica</b>	114	110	127	128	142	129
	<b>% de cobertura</b>	<b>92.91</b>	<b>91.52</b>	<b>93.19</b>	<b>92.21</b>	<b>93.20</b>	<b>93.20</b>

## **6.6 OPTIMIZAÇÃO ECONÓMICA DOS SISTEMAS HÍBRIDOS FOTOVOLTAICOS-EÓLICOS NÃO CONECTADOS À REDE ELÉCTRICA**

Na optimização técnica que se levou a cabo, e de acordo com as hipóteses estudadas, o único factor que diferencia um sistema híbrido de outro, em cada local de estudo, é a superfície do módulo fotovoltaico e a área varrida pelo rotor do aerogerador, pois o resto dos componentes supõem-se constantes (igual dimensão de bateria, reguladores, etc.), (*Celik, 2002*) e (*Talavera, 2007*). Portanto, na optimização económica o único parâmetro que temos que comparar é o custo dos módulos fotovoltaicos e o custo dos aerogeradores.

Para cálculo do custo do investimento inicial, foram consultados diversos fabricantes de módulos fotovoltaicos tendo sido obtido um valor médio de 930 € para um módulo com 210 Wp e 1,244 m<sup>2</sup> de superfície, este valor inclui a sua montagem. Analogamente, para o aerogerador com uma potência pico 1000 W considerou-se um custo de 3.718 €, incluindo o fornecimento do mastro e a sua montagem. Portanto na simulação estes custos serão sempre referidos ao metro quadrado de terreno ocupado, que no caso da componente fotovoltaica é de cerca de 1,244 m<sup>2</sup>, e no caso da eólica de 109,35 m<sup>2</sup>. No que concerne aos custos de manutenção e operação do sistema simulado, vão ser também considerados, mas referidos a uma redução do período de vida, tomando como referência a garantia dada pelos fabricantes. Assim, os fabricantes dos módulos dão garantias de 20-25 anos, e os fabricantes dos aerogeradores dão garantias de 4-7 anos.

Como ao cabo destes períodos de tempo, tanto os módulos como os aerogeradores têm um valor residual, vamos supor que esse valor residual é semelhante aos custos de operação e manutenção nos anos de garantia, pelo que no aspecto económico, vamos considerar os anos de garantia indicados pelos fabricantes aos anos de vida da instalação e supomos também que os custos de operação e manutenção sejam nulos.

Vamos pois considerar, um período de vida de 20 anos para os módulos, e um período de vida de 5 anos para o aerogerador. Não se vão considerar juros ou inflação. Podemos, finalmente, obter os custos por metro quadrado de terreno e ano, tanto do módulo fotovoltaico como do aerogerador, os quais estão indicados na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 Custo total por metro quadrado de terreno e ano do módulo fotovoltaico e aerogerador

	Fotovoltaico	Eólico
Potência nominal gerador W	210	1000
Custo unitário gerador em euros	930	3.710
m <sup>2</sup> terreno ocupado pelo gerador	1,24	109,35
Anos de vida	20	5
Custo euros/m <sup>2</sup> terreno.ano de vida	37,38	6,80

A partir destes custos, e tendo em conta as áreas do terreno obtidas nas simulações técnicas dos sistemas híbridos, obtemos o custo de cada combinação fotovoltaica-eólica por ano de vida, os quais se indicam na Tabela 6.13 e Figura 6.6

Tabela 6.13 Custo por ano de vida dos sistemas híbridos estudados, em €/Sistema

% solar	Funchal	LdeBaixo	PPargo	SJorge	Areeiro	PSanto	% eólico
<b>0</b>	1222,29	669,07	210,33	212,53	86,69	94,44	<b>100</b>
<b>10</b>	1103,80	605,91	193,04	195,02	81,77	88,74	<b>90</b>
<b>20</b>	985,31	542,74	175,75	177,50	76,84	83,04	<b>80</b>
<b>30</b>	866,83	479,58	158,46	159,99	71,91	77,33	<b>70</b>
<b>40</b>	748,34	416,41	141,16	142,48	66,98	71,63	<b>60</b>
<b>50</b>	629,85	353,24	123,87	124,97	62,05	65,93	<b>50</b>
<b>60</b>	511,36	290,08	106,58	107,46	57,12	60,22	<b>40</b>
<b>70</b>	392,87	226,91	89,29	89,95	52,20	54,52	<b>30</b>
<b>80</b>	274,39	163,74	72,00	72,43	47,27	48,82	<b>20</b>
<b>90</b>	155,90	100,58	54,70	54,92	42,34	43,11	<b>10</b>
<b>100</b>	37,38	37,38	37,38	37,38	37,38	37,38	<b>0</b>

Se dividirmos o custo anual das instalações, do Quadro e Figura anteriores, pelos kWh de origem renovável produzidos anualmente em cada instalação, Tabela 6.14, obtidos a partir da cobertura renovável da procura diária de energia, e do número de dias do ano, obtemos finalmente o custo do kWh de origem renovável para cada instalação, Tabela 6.15 e Figura 6.7.

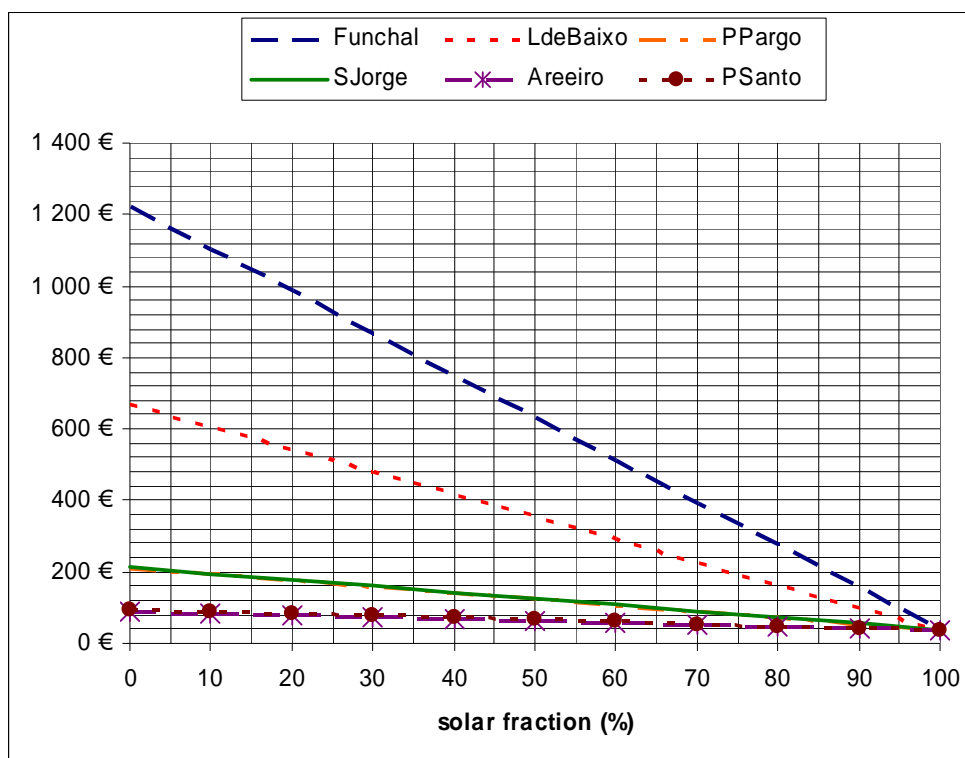


Figura 6.6 Custo por ano de vida dos sistemas híbridos estudados, em euros/sistema

Tabela 6.14 Energia de origem renovável produzida anualmente pelos sistemas híbridos estudados, em kWh

%Solar	Funchal	LdeBaixo	PPargo	SJorge	Areeiro	PSanto	%Eólica
<b>0</b>	122	191	233	185	255	276	<b>100</b>
<b>10</b>	139	202	244	197	262	279	<b>90</b>
<b>20</b>	157	213	254	207	268	281	<b>80</b>
<b>30</b>	173	224	263	218	273	283	<b>70</b>
<b>40</b>	190	234	270	227	276	282	<b>60</b>
<b>50</b>	206	243	276	235	275	279	<b>50</b>
<b>60</b>	221	250	277	240	271	276	<b>40</b>
<b>70</b>	234	254	275	241	266	272	<b>30</b>
<b>80</b>	244	255	269	238	260	268	<b>20</b>
<b>90</b>	243	251	263	232	254	265	<b>10</b>
<b>100</b>	234	246	255	224	247	261	<b>0</b>

Tabela 6.15 Custo da energia de origem renovável produzida pelos sistemas híbridos, em €/kWh

%Solar	Funchal	LdeBaixo	PPargo	SJorge	Areiro	PSanto	%Eólica
0	10,0354	3,5112	0,9017	1,1462	0,3404	0,3427	100
10	7,9211	2,9976	0,7926	0,9921	0,3122	0,3182	90
20	6,2941	2,5440	0,6932	0,8564	0,2867	0,2954	80
30	5,0005	2,1414	0,6035	0,7353	0,2635	0,2735	70
40	3,9468	1,7788	0,5224	0,6278	0,2427	0,2542	60
50	3,0648	1,4546	0,4490	0,5314	0,2253	0,2363	50
60	2,3169	1,1605	0,3844	0,4469	0,2104	0,2184	40
70	1,6760	0,8918	0,3252	0,3726	0,1962	0,2004	30
80	1,1239	0,6432	0,2675	0,3042	0,1816	0,1819	20
90	0,6422	0,4005	0,2081	0,2370	0,1666	0,1629	10
100	0,1601	0,1522	0,1466	0,1668	0,1513	0,1435	0

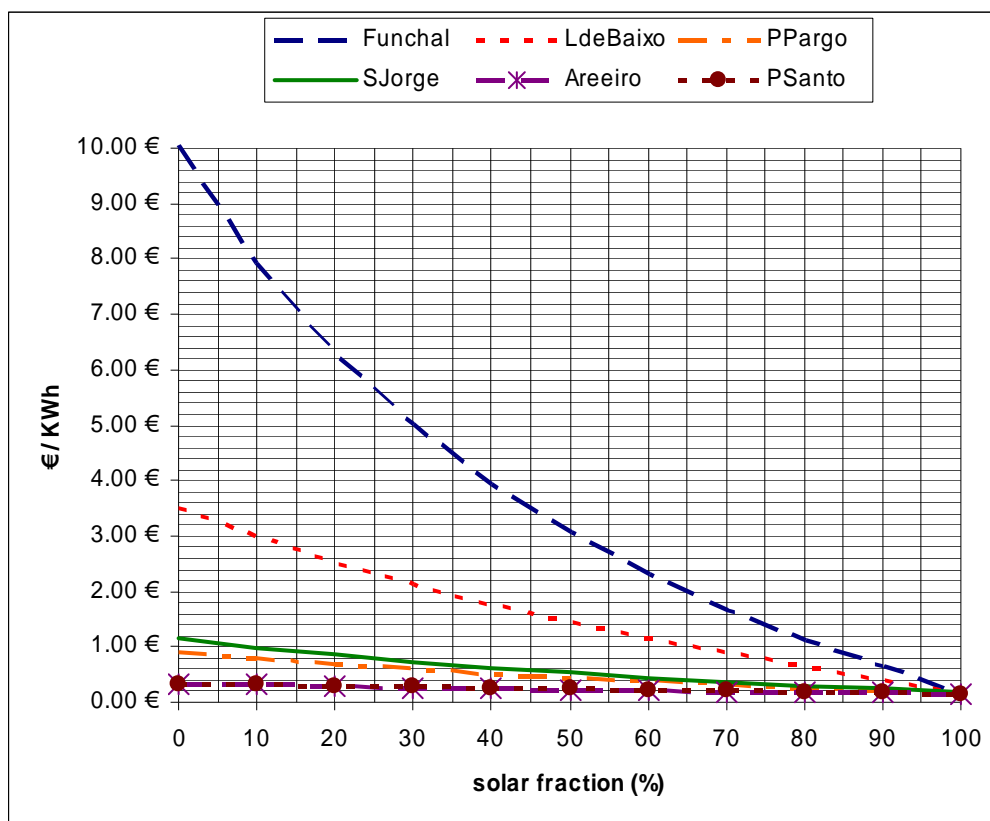


Figura 6.7 Custo da energia de origem renovável produzida pelos sistemas híbridos, em €/kWh

A conclusão que se pode tirar da análise das Tabelas 6.13, 6.14 e 6.15, e das Figuras 6.5 e 6.6, é que o custo das instalações híbridas e o custo do kWh renovável produzido nas instalações diminuem em todas elas ao diminuir a percentagem do sub-sistema eólico no sistema híbrido

fotovoltaico-eólico. O custo mais baixo é sempre o da instalação 100% fotovoltaico. Como as seis estações estudadas são representativas da diversidade climatológica do arquipélago da Madeira, nomeadamente do Funchal, Lugar de Baixo, Ponta do Pargo e São Jorge (faixa costeira da ilha da Madeira), Areeiro (zonas altas do interior da ilha de Madeira) e de Porto Santo (que representa toda essa pequena ilha) – podemos concluir que, ainda que dentro do ponto de vista técnico (máximo aproveitamento energético) as soluções ótimas dos sistemas autónomos híbridos obtêm-se com percentagens díspares de fotovoltaico/eólico, dependendo do local.

Nos lugares costeiros da ilha de Madeira, o óptimo técnico obtêm-se com a maior proporção de fotovoltaica que de eólica, ao passo que nos lugares altos da ilha da Madeira e na ilha de Porto Santo o óptimo obtêm-se com maior proporção de eólica que de fotovoltaica.

Do ponto de vista económico o óptimo obtêm-se sempre só com os sistemas autónomos fotovoltaicos.

Assim a região dispõe de condições muito favoráveis para o aproveitamento da energia solar fotovoltaica para produção de electricidade pelo que deverá ser elaborado um estudo fundamentado dos diversos locais com aptidão técnica e económica para a instalação a curto e médio prazo de Parques Solares Fotovoltaicos de pequena e média dimensão espalhados pelo arquipélago.

## CAPITULO 7

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE INVESTIGAÇÃO

---

## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE INVESTIGAÇÃO

### 7.1 CONCLUSÕES

Nesta tese apresentou-se um estudo de investigação sobre a optimização de sistemas híbridos fotovoltaicos e eólicos em zonas insulares de diversidade climática, aplicado ao arquipélago da Madeira. Foi realizado no período de 2002 a 2007 no Laboratório Regional de Engenharia Civil e com deslocações ao Laboratório de Energia Solar da Universidade de Vigo.

Uma parte do trabalho foi dedicada ao estudo da evolução histórica e situação actual do aproveitamento energético dos recursos endógenos no arquipélago da Madeira. Como conclusão destacar que estes foram desde sempre utilizados de acordo com algumas das melhores tecnologias existentes em cada época. Para a realização do estudo utilizou-se uma base de dados com registos diários de radiação solar, temperatura do ar e velocidade do vento no período 2002-2005 das estações do IM existentes no arquipélago. No total foram utilizadas seis estações meteorológicas, cinco na ilha da Madeira (Funchal, Lugar de Baixo, Ponta do Pargo, Areeiro e S. Jorge) e uma na ilha do Porto Santo.

A análise da irradiação solar global diária média mensal e média anual em cada uma das estações permitiu concluir o seguinte:

- a. Os valores médios anuais mais altos registaram-se no Porto Santo à volta de  $5000 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$ , a Ponta do Pargo e o Areeiro, ambos com cerca de  $4900 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$ , a seguir o Lugar de Baixo com  $4600 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$ , depois o Funchal com cerca de  $4400 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$  e, por fim, S. Jorge com cerca de  $4300 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$ .
- b. Os valores registados na estação do Porto Santo mostram que nesta ilha ocorre mais radiação solar ao longo do ano que na ilha de Madeira, excepto nos meses de Junho e Julho, em que os quantitativos nas estações da Ponta do Pargo e Areeiro são superiores.

- c. As diferenças maiores de radiação solar mensal entre as seis estações registam-se de Maio a Agosto. Nestes meses é quando mais se diferenciam Porto Santo, Ponta do Pargo e Areeiro das outras três estações.
- d. Nos meses de Setembro e Outubro a radiação solar é muito semelhante em todas as estações.
- e. O valor máximo de radiação solar é verificado no Areeiro no mês de Julho.
- f. No Funchal e Lugar de Baixo, a radiação solar praticamente permanece constante nos meses de Maio a Agosto. Nesse período, o Funchal é a estação que recebe menos radiação solar, sem dúvida devido ao fenómeno do “capacete”.
- g. O Funchal é a estação que mantém um nível de radiação mais uniforme ao longo do ano.

A análise das temperaturas médias diárias mensais e anuais, das temperaturas médias das máximas diárias mensais e anuais e das temperaturas médias das mínimas diárias mensais e anuais permitiu concluir o seguinte:

- a. As temperaturas máximas anuais registam-se em todas as estações ao redor do mês de Agosto, e as temperaturas mínimas em torno do mês de Fevereiro.
- b. A evolução das temperaturas ao longo do ano, tanto no caso das médias como nas médias dos valores máximos e nas médias dos valores mínimos, segue uma tendência similar em todas as estações.
- c. A altitude da estação é o factor determinante nestas diferenças, de tal maneira que quanto maior for a altitude menor são, em geral, as temperaturas médias. Para facilitar o cálculo da produção fotovoltaica definiram-se os dias característicos de radiação solar e de temperatura de cada mês. O dia característico de radiação solar dum mês é um dia definido por uma duração igual à média do mês (horas máximas de sol), com uma irradiação solar diária igual à média do mês, e com uma distribuição de irradiancias solares ao longo

do dia coincidente também com a distribuição média do mês. Como apenas se dispunha dos valores diários de radiação nas estações, utilizou-se uma aproximação do tipo sinusoidal para a distribuição diária da irradiância solar. Da mesma forma, o dia característico de temperatura dum mês define-se como um dia com uma duração do dia (horas máximas de sol) igual à média do mês, com uma temperatura média em horas de luz igual à média do mês nessas mesmas horas, e com uma distribuição de temperaturas ao longo do dia coincidente também com a média do mês. Também para a temperatura como apenas se dispunha dos valores médios, máximos e mínimos diários, utilizou-se uma aproximação do tipo sinusoidal para a distribuição diária da temperatura, que utiliza os valores de temperatura máxima e mínima diários.

A partir dos valores da velocidade média diária do vento nas seis estações meteorológicas obtiveram-se as velocidades médias diárias mensais e anuais. Como os dados foram medidos a 10 metros de altura sobre o terreno, altura standard, foi necessário estimar as velocidades médias diárias mensais para uma altura de 23 metros mediante a utilização de uma função logarítmica, já que é a altura a que se supõe estar colocado o eixo do rotor do aerogerador. Como não se dispunha de valores de velocidades instantâneas do vento nas estações, a distribuição de frequências de velocidades do vento ao longo do dia estimou-se, a partir das velocidades médias, considerando o seu modelo segundo uma função probabilística de Weibull.

Para a realização do estudo definiu-se uma instalação solar fotovoltaica tipo, suposta a funcionar em cada uma das seis estações meteorológicas, instalação constituída por um módulo fotovoltaico colocado num plano horizontal, e um regulador de carga para se obter sempre a máxima potência possível. O modelo do módulo fotovoltaico e de regulador de carga escolhidos são os mesmos para todas as instalações e apresentam boas características técnicas, podendo ser adquiridos no mercado. Para calcular a potência de saída utilizou-se um modelo matemático simplificado da equação corrente-tensão(I-V) amplamente referido na literatura da especialidade. A razão para considerar os módulos colocados num plano horizontal é que, desta forma, a radiação solar que recebem é a radiação global ou total que se mede nas estações e que é a utilizada na definição dos dias característicos da radiação.

Acresce que esta colocação permite referir a produção fotovoltaica não só por cada metro quadrado do módulo fotovoltaico como também por cada metro quadrado de superfície horizontal (já que ambas as superfícies coincidem) o que torna possível extrapolar os resultados de forma fácil a toda a superfície do arquipélago. Assume-se que não existem sombras de nenhum tipo que afectem os módulos fotovoltaicos. O estudo foi limitado à produção de energia eléctrica em corrente contínua produzida à saída do regulador.

Para o estudo definiu-se também uma instalação eólica tipo, suposta a funcionar em cada uma das estações meteorológicas. A instalação tipo é constituída por um gerador eólico e um regulador de carga para se obter a máxima potência possível. O modelo de gerador eólico e de regulador de carga escolhidos são os mesmos para todas as instalações e apresentam boas características técnicas, podendo ser também adquiridos no mercado. O aerogerador supõe-se colocado a uma altura de 23 metros do solo e para o cálculo da potência de saída utilizou-se a sua curva característica de potência. Para que os resultados se pudessem comparar com os resultados obtidos na produção fotovoltaica, a produção eólica referiu-se a metro quadrado de área varrida pelo rotor do aerogerador, por metro quadrado de área de terreno que ocupa este, supondo existirem mais aerogeradores similares ao redor. O sistema híbrido considerado no estudo para fazer a simulação de funcionamento é um sistema constituído por três sub-sistemas a saber: um sub-sistema fotovoltaico, um sub-sistema eólico, e um sub-sistema de armazenamento de energia. O estudo faz-se considerando as potências dos sub-sistemas fotovoltaico e eólico em proporções variáveis.

Consideraram-se as seguintes hipóteses: i) A procura diária de electricidade é constante em todo o período; ii) A procura diária de electricidade é constante, independentemente da proporção em que se considerem as componentes electroprodutoras fotovoltaica e eólica do sistema híbrido em cada simulação; iii) A procura diária de electricidade é específica em cada local de estudo, e igual à média da produção diária, considerando o período de quatro anos de estudo, do sistema *FV-E*; e iv) A capacidade de armazenamento do banco de baterias é suficiente para 3 dias de consumo admitindo não haver perdas por auto-descarga.

Qualquer caso geral de composição do sistema híbrido seria constituído por uma percentagem do sistema todo-solar (100% fotovoltaico), e uma percentagem, complementar do anterior até alcançar os 100 %, do sistema todo-eólico (100 % eólico). Desta forma garante-se que para qualquer proporção fotovoltaica/eólica no sistema híbrido em cada local de estudo, a sua

produção média diária anual é sempre a mesma e, portanto, a procura diária também é sempre a mesma.

Com estas hipóteses, pensadas para que os resultados fossem os mais gerais possíveis, ao se relacionar a procura de energia/consumo com a produção anual do sistema híbrido, já não é necessário fazer a simulação dos sub-sistemas fotovoltaico e eólico em tamanho real, bastando apenas conhecer a proporção exacta destes, e extrapolar os resultados obtidos em percentagem para qualquer dimensão.

Esta nova metodologia, ao permitir fornecer as potências dos componentes fotovoltaico e eólico em metros quadrados de terreno, possibilita simular facilmente qualquer sistema, bastando para tal variar a proporção desejada. Da análise comparativa dos resultados da produção energética das diferentes composições percentuais fotovoltaico e eólico, podemos avaliar facilmente o grau de cobertura com energia renovável. Por outro lado, no estudo desenvolvido, concluímos que utilizando apenas relações de potência entre as componentes fotovoltaica e eólica do sistema híbrido, ou relações de metros quadrados equivalentes, não é necessário recorrer a modelos reais de módulos e aerogeradores na simulação da configuração pretendida (excepto no que diz respeito às características e rendimentos dos mesmos). Conhecidas as percentagens de cobertura da procura que se obtêm com energias renováveis, é possível definir com segurança as percentagens solar/eólica que oferecem as melhores opções técnicas.

A ilustrar o que se disse e para os 6 locais estudados concluímos que:

- Em todos os locais, a percentagem óptima da produção de energia dos sistemas híbridos (fotovoltaicos-eólicos) é muito alta, superior a 90 %, sendo necessário recorrer a energias convencionais apenas para cobrir uma pequena parcela.
- Nos lugares costeiros da ilha de Madeira, o óptimo obtém-se com maior proporção de fotovoltaico, sendo isto mais acentuado na costa sul do que na costa norte, em contrapartida, nos lugares de maior altitude na ilha da Madeira e na ilha de Porto Santo, o óptimo obtém-se com maior proporção de eólica.

- Se nos afastarmos do ponto óptimo nas faixas costeiras da ilha de Madeira, diminui-se mais acentuadamente a cobertura renovável ao incrementar a percentagem eólica do que ao incrementar a percentagem fotovoltaica.
- Nas zonas altas das ilhas de Madeira e Porto Santo as diminuições de cobertura das energias renováveis pela variação da percentagem fotovoltaica-eólica são mais suaves e similares em ambas variações.

Em termos de optimização técnica, concluímos que o único factor que diferencia um sistema híbrido de outro, nos 6 locais estudados, é a área do módulo fotovoltaico e a área varrida pelo rotor do aerogerador, pois todos os outros componentes admitem-se constantes. Salientamos assim, que na optimização económica os únicos parâmetros que devem ser comparados inicialmente são os custos dos módulos fotovoltaicos e o dos aerogeradores.

Face ao exposto, concluímos que a Região Autónoma da Madeira possui excelentes condições climáticas para a conversão fotovoltaica. Em nosso entender, a curto e médio prazo, o recurso solar deverá ser explorado para produção de electricidade através de parques solares e disseminação de pequenas instalações. Desta forma, será possível reduzir a vulnerabilidade regional em termos de segurança do abastecimento e também atingir a meta dos 39 % do consumo de electricidade a partir de energias renováveis, imposta pela União Europeia até 2010.

## **7.2 SUGESTÕES DE INVESTIGAÇÃO**

Concluímos que a região dispõe de condições muito favoráveis para o aproveitamento da energia solar fotovoltaica para a produção de electricidade. Em nosso entender deverá ser elaborado um estudo fundamentado dos locais mais adequados para a instalação a curto e médio prazo de parques solares fotovoltaicos de pequena e média dimensão.

Assim, e de forma sintética, enumeram-se algumas linhas de investigação que se afiguram como prioritárias:

- A. Desenvolvimento de um programa para monitorização de três sistemas híbridos fotovoltaicos-eólicos, localizados em locais distintos (Fanal, Chão dos Louros e

Deserta Grande) visando a recolha de dados climáticos e energéticos bem como a construção de uma base de informação de interesse científico e técnico que permita testar a metodologia anteriormente desenvolvida;

- B. Elaboração de um Mapa com locais adequados para a instalação de parques solares e eventualmente híbridos, estudado em termos de recurso energético dos locais, condicionalismos de ordem física, ambiental e de interligação às redes eléctricas.
- C. Estudo, investigação e aplicação de novos materiais fotovoltaicos à arquitectura dos edifícios na cidade do Funchal, nomeadamente em coberturas e fachadas, visando a utilizando de um novo conceito de arquitectura solar fotovoltaica (PVBD).
- D. Construção de um modelo em escala adequada visando o estudo do escoamento atmosférico em túnel de vento, para estudar os efeitos do relevo dado que o escoamento atmosférico sobre uma montanha com as características da Madeira é fortemente influenciada pela estratificação atmosférica e por efeitos não lineares.

As linhas de investigação devem envolver Universidades, Laboratórios e outras entidades públicas e privadas da União Europeia.

## CAPITULO 8

### REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

---

## 8. REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

Almada, F., Soares, A., M., 1981- *Ondas do Mar: uma enorme fonte de energia*, Pêndulo – Invenção e Inovação Tecnológica, Limitada- Funchal 1981- Projecto Pêndulo

*Atlas de Radiación Solar A CATALUNYA*, 2000 - Institut Català d'Énergia –Universitat Politècnica de Catalunya.

Aguilar J., P.Perez, J. De La Casa y C. Rus. 2006 - *Cálculo de la Energía Generada por un Sistema Fotovoltaico conectado a red: aplicación docente*. VII Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica (TAAE 2006).Madrid, 2006. ISBN: 84-689-9590-8.

Aguiar, Ricardo, Castro, Susana, Joyce, António, 2002 - *Estimativas Instantâneas do Desempenho de Sistemas Solares Fotovoltaicos para Portugal Continental* - XI Congresso Ibérico e VI Congresso Ibero-Americano de Energia Solar-Algarve.

Bagul, A., Salameh, Z., M. Borowy, 1996 - *Sizing of stand-alone hybrid wind-photovoltaic system using a three-event probability densidade approximation*.

Ballard, L., Swansborough, R., Johnson, R., 1983 - *Detailed Specification for a Pilot Wind Power Scheme on Porto Santo* – ERA – Technology –England.

Beyer, G., Langer C.1996 - *A method for the identification of configurations of PV/WIND hybrid systems for the reliable supply of small loads*.

BMFT/KfW, 1990 - *Wind Energy Project – Monitoring Program –Wind Park Porto Santo, Madeira* –DECON- Deutsche Energie - Consult Ingenieuresellschaft mbH.

Bin, A., Hongxing, Y., Hui, S., Xianbo, L., 2003 - *Computer aided design for PV/Wind hybrid system- 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion-May-2003* – Osaka-Japam.

Bouges, B., Scharmer, K., 2000 - *The new European Solar Radiation Atlas: a tool for designers, engineers and architects* - Ecole des Mines de Nantes –Gesellschaft für Entwicklungstechnologie GmbH- Karl-Heinz.

Bravo, L., Haselhuhn, R., Hermerle, C., 2004 - *Instalaciones Fotovoltaicas* - Manual para uso de instaladores, Fabricantes, Proyectistas, Ingenieros y Arquitectos, Instituciones de Enseñanza y de Investigación- SODEAN, S.A., DGS LV Berlin-Brb, ISBN 3-934595-31-6.

Brito, M., Pinto, C., Gamboa, R., Alves, A.J., A Varella, 2002 – *Investigação e desenvolvimento de fitas de silício para aplicação fotovoltaica*–Depº Física, Universidade de Lisboa, FCUL-XI Congresso Ibérico e VI Congresso Ibero-Americano de Energia Solar-Algarve.

Brito, M., Serra J., 2005 - *Células solares para produção de energia eléctrica* – Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa-Revista QUANTUN, nº1.

Campos, M., Lopes, P., 2005 - *Sistemas Híbridos VAWT/FV para Abastecimento de Locais Remotos*-Instituto Superior Técnico.

Carrasco, G., Galimberti, P., Barral, J., 1996 - *Desarrollo de componentes de sistemas fotovoltaicos para simulación bajo distintas condiciones climáticas*. Universidade Nacional de Rio Cuarto, Córdoba, Argentina.

Castro, R. M .G., 2004 - *Introdução à Energia Fotovoltaica – Energias Renováveis e Produção Descentralizada*,- IST- Universidade Técnica de Lisboa.

Castro, R. M. G., 2004 – *Introdução à energia Eólica-Energias Renováveis e Produção Descentralizada*, IST, Universidade Técnica de Lisboa.

Celik, Ali Naci., 2001 - *The system performance of autonomous photovoltaic-wind hybrid energy systems using synthetically generated weather data*.

Celik, Ali Naci., 2002 -*Techno-economic analysis of autonomous PV-wind hybrid energy systems using different sizing methods.*

Colin, H., 2003 -*Photovoltaic Hybrid System Modelling at GENECEA-GENECEA-CEA France.*

Costa, P., A. Estanqueiro, 2003 - *A Methodology to Compute Wind Resource Grids in Complex Terrain Based on Multiple Anemometric Stations.* European Wind Energy Conference, Junho, Madrid.

Cordes, V., 2000 - *Tecnologias fotovoltaicas para sistemas híbridos.*

Collares-Pereira, M., 1998 - *Energias Renováveis, A Opção Inadiável*, Sociedade Portuguesa de Energia Solar, ISBN 972-95854-3-1.

Cruz, J., Sarmiento, A., 2004 – *Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais*, IST, WEC-Wave Energy Centre, Instituto do Ambiente, 2004, ISBN: 972-8577-11-7

Camacho, Ornelas, 1990 - *O Programa VALOREN na Região Autónoma da Madeira,- Seminário de Apresentação do Plano Energético Regional-PERAM –Março 1990*

Danish Wind Industry Associations. [www.windpower.org](http://www.windpower.org)

Decon-Deutsche Energie, 1990 - *Wind Park Porto Santo, Madeira- Consult Ingenieurgesellschaft , BMFT/KfW-Wind Energy Project-1990.*

Documento – 2000- *Caça à Baleia no Arquipélago da Madeira* -Câmara Municipal de Machico, Edição do Museu da Baleia.

Documento Técnico - *Introdução ao Gás Natural na Madeira* –Vice Presidência do Governo Regional da Madeira-EEM-2004

Documento - *Historial do Museu Etnográfico da Ribeira Brava*, Revista Islenha, nº 19 Jul-Dez-1996, Direcção Regional dos Assuntos Culturais, Secretaria Regional do Turismo e Cultura.

Documento - Valor Ambiente- *Energia Eléctrica produzida na Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos da Ilha da Madeira*- 2006

Documento Wavegem- Wave Pump Submergible e Power Generator ,2004, EEM, AREAM.

Documento Whispers – aerogeradores; características técnicas WHISPER-2000  
[http://windenergy.com/whisper\\_200.htm](http://windenergy.com/whisper_200.htm)

EEM, 1999 - *Análise das Medidas do Vento efectuadas no Caniçal*, Gabinete de Estudos e Projectos de EEM.

EEM, 1999 - *Análise dos Recursos Energéticos Endógenos-Medidas de Vento -2º Semestre*- Gabinete de Estudos e Projectos da EEM - Março2000.

EEM - *Relatório de Actividades da Empresa de Electricidade da Madeira* - 2004

EEM -*Relatório de Actividades da Empresa de Electricidade da Madeira* -2005

EEM - *Relatório de Actividades da Empresa de Electricidade da Madeira* -2006

Elforst AB, Sweden, 2000 - *A PV/Wind Hybrid System- of a National Park in the archipelago of Stockholm*, Sweden.

ERA Technology, 1984 - *Detailed Specification for a Pilot Wind Power Scheme on Porto Santo*- Report Nº 84-0055 1984.

Estanqueiro, A.I., Ferreira de Jesus, J. M., 1996 - *Caniçal Wind Park –Dynamic Behaviour Assessment with INPark Model*-INETI - Joule III project power Control JOR3-CT95-0067.

Estanqueiro, A., 1997 - *Modelação Dinâmica de Parques Eólicos*. IST, Universidade Técnica de Lisboa, Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica.

Esteves, Teresa, M.S., 2004 - *Base de Dados do Potencial energético do Vento em Portugal- Metodologia e Desenvolvimento* - Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Ciências e Engenharia da Terra.

Figueira, Agostinho, 2007 - *As energias renováveis e a produção de electricidade na Ilha da Madeira-EEM*- Conferência sobre as Alterações Climáticas e Energias Renováveis.

Focus on energy, 2004 - *Owning a PV/Wind Hybrid System: Being Your Own Utilit.*

Fonseca, H. D., 1968 - *Contribuição para o estudo do aproveitamento racional da energia do vento no território nacional*- Serviço Meteorológico de Angola.

Fonseca, H. D., 1980 – *A Escola de Sagres e as Máquinas Aeromotoras Navais*, Revista Inventiva-Associação Portuguesa de Criatividade – Nº Abr/Set. 30/31 1980.

Fórum de Energias Renováveis em Portugal, 2001 - *Relatório Síntese*- ADENE e INETI, ISBN 972-8646-01-1.

Gabriel, R., Fadigas, E., 2002 - *Elaboração de Diagnóstico e Plano de Metas Orientadas a Disseminação de Geradores Eólicos de Pequeno Porte nas Áreas Rurais*- Produção em Iniciação Científica da EPUSP.

Garcia, F. H., 2004 - *Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólicos-Fotovoltaicos* - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Tese de Doutorado - Porto Alegre- Janeiro.

Garcia, J.; Badell, 1983 - *Cálculo de La Energia Solar*, INIA- Madrid.

Guerra, 1996 – *Historial do Edifício do Museu Etenográfica da Madeira*, Ribeira Brava, Revista Islenha, nº 19 Jul-Dez-1996, Direcção Regional dos Assuntos Culturais, Secretaria Regional do Turismo e Cultura.

Gonçalves, Helder, 1989 - *Edifícios Solares Passivos em Portugal*-INETI-Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação.

Guia da Energia Solar, 2005 - SPES-Sociedade Portuguesa de Energia Solar.

Greif, J. K. 2000. *ESRA, European Solar Radiation Atlas* (4<sup>th</sup> revision)

Halouani, N., Nguyen, C., Vo-Ngog, D., 2000 - *Calculation of monthly average global solar radiation on horizontal surfaces using daily hours of bright sunshine.*

Hille G., Roth,W., Schmidt H. (1995) “*Course book seminar “Photovoltaic Systems”*”, Comett Project SUNRISE, Fraunhofer Institut (FhG-ISE), Freiburg.

Hoque, A., Ahsan Q., 1995 - *Wind and solar generating units: potencial candidates for a generation mix of an isolated area* - Department of Electrical and Electronic Engineering, Queen’s University of Belfast.

Hoyos, D. ; Cadena, C.; Suarez, H., 2000 - *Sistema de Medición de la Irradiancia Solar Global*, Instituto Nacional de Energia no Convencional –Argentina.

<http://g.unsa.edu.ar/asades/actas2000/08-23.html>

Imamura, M.S., Helm, P. E Palz, W., 1992 - *Photovoltaic System Technology: “European Handbook”*, Commission of the European Communities, Luxembourg,

Wenham, S.R., Green,\_M.A.; Watt, M.E, (1992) “*Applied Photovoltaics*”, Kensington, Australia.

INEGI, 2002 - *Estudo das Características do Vento e do Potencial Eólico no Paúl da Serra-ENEREEM.*

INEGI, 2004 - *Parques Eólicos em Portugal.* [ahk@inegi.pt](mailto:ahk@inegi.pt)

INEGI, 2005 - *Short Term Measurements of Wind Characterisitcs at Station PORT321, Paúl da Serra - Madeira, Junho 2005.*

INETI, 2004 – Estudo de viabilidade de produção de biogás no Santo da Serra, LREC, Universidade de Évora e Dessis.

INETI, 2005 - *Avaliação do Potencial Energético da Biomassa na Região Autónoma da Madeira*, Relatório Final, Julho de 2005, Projecto ERAMAC- Maximização da Penetração das Energias Renováveis e Utilização Racional da Energia nas Ilhas da Macaronésia, Vice Presidência Governo Regional da Madeira, AREAM

Janisch, V., Drechsel H., 1983 - *Solare Meerwasser –Entsalzung-Porto Santo, Madeira Portugal-* GTZ, Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien- Technische Universität Berlin.

Janisch, V., Drechsel H., 1985 - *Solare Meerwasser –Entsalzung-* GTZ, Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - Technische Universität Berlin.

Janisch, V., Drechsel H., 1987 - *Solare Meerwasser –Entsalzung-Porto Santo, Madeira Portugal* ,GTZ -Technische Universität Berlin, 1987

Joyce, A., Rodrigues, C., Manso, R., 2001- *Modelling a PV system*, Departamento de Energias Renováveis - INETI-Instituto Nacional de Engenharia ,Tecnologia Industrial, Renewable Energy, 22 (2001), 275-289 Pergamnom.

Joyce, A., 2000 - *Sistemas Fotovoltaicos* –Departamento de Energias Renováveis- INETI-Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia Industrial.

Joyce, A., 2005 - *Sistemas Fotovoltaicos* –Departamento de Energias Renováveis- INETI-Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, IP.

Kaldellis, J., Kostas, P., 2006 - *Minimization of the Energy Storage Requirements of a Stand-alone Wind Power Installation by Means of Photovoltaic Panels-* Laboratory of Soft Energy Applications and Environmental Protection, Mechanical Engineering Departement.Athens, Greece.

Koutroulis, Eftichios, Kolokotsa Dionissia, Potirakis Antonis, Kalaitzakis Kostas, 2005- *Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms*,

Kreith;Kreider, 1978 - *Principles of Solar Engineering*.

Krenzinger, A.,(190?) - SOLARCAD - *Sistema de Simulação de Instalações de Energia Solar* - Laboratório de Energia Solar -GESTE/PROMEC/UFRGS.

Labed, S., 2004 – *Contribución al desarrollo de métodos para la electrificación rural fotovoltaica a gran escala*, Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación - Universidade Politécnica de Madrid

López, G., Martinez, M., Rubio, M., Barbero, F., Batlles, F., 2000 - *Estimación de la Radiación Global Solar Diária mediante un Modelo de Red Neuronal* – Depº. Física Aplicada-Universidade de Almeria-IXCongresso Ibérico de Energia Solar-III Jornadas Técnicas sobre Biomassa-Cóbova, Março 2000.

López, Arisa, F.,J., Luque, López, R., 1994 - *Electrificación voltaica versus electrificación convencional. Fragmentación del territorio según viabilidad económica mediante sistemas de información geográfica*.Tesis Doctoral, Universidad de Cordoba, Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Agronomos y Montes.

Lorenzo, Eduardo, Araújo G., Cuevas, Egidio M., Miñano J., Zilles, R., 1994- *Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems*, Institute of Solar Energy, Polytechnic University of Madrid- Progreña – 1999

Ludwig Gunther, 1987 – *Klimagerechtes Bauen in Warmen, sommer-trockenen Gebieten am Beispiel der “Casa Solar Passiva” auf Porto Santo, Madeira, Portugal*, Technische Universitat Berlin, 1987.

Ludwig Gunther, 1987 – *Passives Solar Gedaude Porto Santo, Madeira, Portugal*, Technische Universitat Berlin, 1987

LREC - DHTE - 2005 - *Relatório de Actividades 2004*.

LREC - DHTE - 2006 - *Relatório de Actividades 2005*.

LREC - DHTE - 2007- *Relatório de Actividades 2006*.

Magro, J. C., 1988 - *Parque Eólico do Cabeço do Carvalho* - Revista da Energia Solar e da Biomassa-Revista nº. 13 - Sociedade Portuguesa de Energia Solar.

Magro, J. C., 1991 - *A importância das energias renováveis na produção de água potável na Ilha do Porto Santo* - Seminário promovido pela DGXVII-Atenas.

Magro, J. C., 2001 - *As energias renováveis na gestão e desenvolvimento sustentado das reservas naturais da Madeira* - III Jornadas da Engenharia Insular- Canárias, Açores, Madeira e Cabo Verde – Setembro- Gran Canária.

Magro, J. C., 2002 - *Sistemas fotovoltaicos e híbridos na gestão e desenvolvimento sustentado das reservas naturais da Madeira*-XI Congresso Ibérico e VI Congresso Ibero-Americano de Energia Solar-Vila Mourra-Algarve.

Magro, J. C., 2003 - *A energia fotovoltaica na gestão e desenvolvimento sustentado das reservas naturais da Madeira*-Revista Islenha-25/12/2003.

Magro, J. C., 2004, *A problemática da utilização de sistemas fotovoltaicos e híbridos em zonas insulares de diversidade climática*-Ilha da Madeira-XII Congresso Ibérico e VII Congresso Ibero-Americano de Energia Solar-Vigo-Espanha.

Magro, J. C., Neves, J. C., Silva, S.L., 2006 - *Implementação de Redes Meteorológicas da Energia no Arquipélago da Madeira*- LREC - XIII Congresso Ibérico e VIII Congresso Ibero-Americano de Energia Solar - Lisboa CIES06.

Markvart, Tomas, 1996 - *Sizing of hybrid photovoltaic-wind energy systems*, England.

Manolakos D., Papadakis G., Papantonis D., Kyritsis S., 2001 - *A simulation-optimisation programme for designing hybrid energy systems for supplying electricity and fresh water*

*through desalination to remote areas - Case study: the Merssini village, Donoussa island, Aegean Sea, Greece. Energy 26 (2001) 679-704.*

Marques da Silva, F., 1996 - *Caracterização do Recurso Eólico*. Em Curso de Formação-Ação do Programa Altener, Energia Eólica, Cap 2, INETI, Lisboa.

Ministério das Obras Públicas, 1944 – *Os aproveitamentos Hidráulicos e a Electrificação da Madeira*, Comissão Administrativa dos Aproveitamentos Hidráulicos da Madeira.

Miranda, P., Valente, M., Ferreira, P., 2003 - *Simulação numérica do escoamento atmosférico sobre a ilha da Madeira-efeitos não lineares e de estratificação no estabelecimento do potencial eólico na zona do Paúl da Serra* - Centro de Física da Universidade de Lisboa.

Miranda, P.M.A, 2002 – *Meteorologia e Ambiente*, Universidade Aberta, Lisboa, Fev,2002, Depósito legal nº 160724/01.

Monteiro, C. D. M., 1996 - *Integração de energias Renováveis na Produção Descentralizada de Electricidade Utilizando SIG*. Dissertação apresentada para satisfação parcial dos requisitos do grau Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Morgan, T., Marshall, R., Brinkworth, B., 1997 - "*ARES*"- *A refined simulation program for the sizing and optimisation of autonomous hybrid energy systems*. Solar Energy Unit, Cardiff School of Engineering, University of Wales.U.K.-Solar Energy Vol.59, Pp 205-215.

Miguel, A., Bilbao, J., Salsón, S., Lage, A., 1994 - *Solar radiation and sunshine hour maps in Castilla and León region (Spain)* - Depº. Física Aplicada I, Facultad Ciencias, Universidad de Valladolid.

Minderico, M., 1995 - *Modelos de sistemas fotovoltaicos para estudos de transito de energia*- Instituto Superior Técnico.

Mc Grow Will ,1999 - *Photovoltaic Energy System, Design and Instalation*

Neves, H. Costa, 1992 - *As Ilhas Selvagens Santuário Ornitológico no Atlântico Norte-Correio da Natureza, Serviço Nacional de Parques, Reservas e Conservação da Natureza*

Neves, J.C., 2005- Estações Meteorológicas automáticas do LREC-IT-DHTE-

Oliveira, E.V., Galhano, F., Peres, B., 1965 - *Moinhos de Vento – Açores e Porto Santo*, Centro de Estudos de Etnologia Peninsular-Lisboa.

Osam, Omari, O., (200?) - *A Simulation Model for Expandable Hybrid Power Systems*-University of Applied Sciences Sudwestfalen, Soest, Germany.

Patel. M.R., 1999 – *Wind and solar power systems*, UK, CRC Press, Ed.1999

Peterson, J.A., Perez, R., Biley, B., Elsholz K., 1999 - *Operational Experience of a Residential Photovoltaic Hybrid System* - *Solar Energy*, Vol 65, nº pp 227-235 Greece. *Energy* 26 (2001).

Pereira 2006, Sistemas híbridos fotovoltaicos eólicos

PERAM-*Plano Energético da Região Autónoma da Madeira*- Relatório Base- 1989-Governo Regional da Madeira

PPERAM-2000 - *Plano de Política Energética da Região Autónoma da Madeira*-Ano de referência 2000- Vice Presidência do Governo Regional da Madeira, AREAM, Setembro 2002.

PRAM-2003- *Plano Regional da Água da Madeira* –PRAM-2003 – Secretaria Regional do Recursos Naturais-Instituto de Gestão da Água.

Paes, P., Rodrigues, C., 1992 – *Monitorização e análise do comportamento de sistemas fotovoltaicos experimentais*, Departamento de Energias Renováveis do Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial.

Pontes, T., 1994 - *Estudo das Ondas no arquipélago da Madeira*- Departamento de Energias Renováveis- INETI-Instituto Nacional de Engenharia ,Tecnologia Industrial.

Protogeropoulos C., Brinkworth, B., Marshall, R., 1997 - *Sizing and techno-economical optimization for hybrid solar photovoltaic/wind power systems with battery storage*.International Journal of Energy Research,Vol.21 pp 465-479.

Pons, X., 2000 - *Estimación de la radiation solar a partir de modelos digitales de elevaciones*. Propuesta Metodológica- Depº. Geografía-Universitat Autònoma de Barcelona.

PROGRESNA, 2002 - *Sistemas de Energia Fotovoltaica*.- Manual del Instalador ASIF – Asociación de la Industria Fotovoltaica.

Projecto MSG- V Programa Quadro da Comissão Europeia - *Micro Redes Eléctricas com geração solar híbrida – a alternativa sustentável para electrificação rural*- SEBA, INETI, Universidade de Vigo, Trama Tecno Ambiental, FEUGA.

PV Policy Group, European Best Practice Report, Intelligent Energy Europe, May 2006  
[www.pvpolicy.org](http://www.pvpolicy.org)

Raimundo, Q, Celso, C., 1989 – *Madeira- Da Floresta primitiva ao Jardim Botânico actual*, Clube de Ecologia Barbusano, Escola Secundária de Francisco Franco, WWF-CTT e DN- Depósito Legal nº 28017/89.

Ramírez, L., Mora, L., Martín, M., Sidrach C. M., 1998 - Calculation of Daily Global Solar Radiation using Multivariate Linear Models, CIEMAT-Madrid.

Ribeiro, J., A., Freitas, L., Fernandes, J.B., 1995- *Moinhos e Águas do Concelho de S.Cruz - Câmara Municipal de Santa Cruz*.

Ribeiro, J. Adriano, 1996 –*Ilha da Madeira: roteiro histórico marítimo* -S.I. Centro Treino Mar, ISB 972-97040-0-7.

Rigollier C., O. Bauer and L. Wald, 2000, *On the clear sky model of the ESRA - European Solar Radiation Atlas - with respect to the Heliosat method*, *Solar Energy*, Vol. 68, nº. 1, pp. 33-48, 2000

Rocha, M., Silva, 1983 - *Estimativa da Radiação Solar Global Incidente em Planos Inclinação voltados para sul, na Madeira*, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica.

Rocha, M., Silva, 1984 - *Estimativa da Radiação Solar Global Incidente em Planos Inclinação voltados para sul, no Porto Santo*, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica.

Rodrigues Carlos N., 1997 - *Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Autónomos*, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Lisboa

Rodrigues, A., M.Ferreira, Pinto, P., 2002 - *Estudo das Características do Vento no Caniçal e Paúl da Serra* - INEGI.

Rodrigues, C., N., Joyce A., 2003 - *Sistemas Híbridos na Electrificação Rural com Micro Redes*-Revista de Energias Renováveis & Ambiente-nº 53-Jul-Dez –Sociedade Portuguesa de Energia Solar.

Rodrigues, G., Imhoff, J., Het, H., 2006 - *Simulação de Sistemas Fotovoltaicos Autónomos Parcialmente Sombreados*, CRITE2006 - XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, VI Feira de Protótipos.

Siegfriedt U., 1999 - *Optimierung von abgeschatteten Solargenerator bei Netzeinspeisung* - Diplomarbeit-TU-Berlin Fachbereich Elektrotechnik, 1999

Sagrilo, M., 2004- *Owning a PV/Wind Hybrid System: Being Your Own Utility- Rezabek Case Study* -

Sidrach de Carmona M., Mora-López, Ramirez S.L., Jimenez M., Navarro , F. , (200?) - *A Generación de años tipo de radiación global y de temperatura para su uso en el dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos*. [http://www.fst.ac.ma/fier/FIER\\_Proceedings.html](http://www.fst.ac.ma/fier/FIER_Proceedings.html)

Spenk, G., 1990 - *Possibilidade de aproveitamento da energia eólica na Madeira-Estudo de Viabilidade*- IBEK- Ingenier und Beratungsgesellschaft fur Organisation und Technik mbH.

Spenk, G., 1989- *Programa de levantamento de dados anemometricos na Ilha da Madeira/Portugal*-Relatório Final, Volume I-IBEK- Ingenier und Beratungsgesellschaft fur Organisation und Technik mbH.

Solar and Energy Resource Assessment, Irradiation Maps - Projecto SWERA;  
[www.dge.inpe.br/swera/swera\\_home.html](http://www.dge.inpe.br/swera/swera_home.html)

Talavera, D., L., 2007 – *Análisis de la rentabilidad de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red mediante la tasa interna de rentabilidad*, Tesis Doctoral, Escuela Politécnica Superior - Universidade de Jaén- Febrero-2007.

Vázquez, Manuel, 2002- *Cuatro Años de Experiência de la Central Hibrida Solar Fotovoltaica de las Islas Cies*, Universidade de Vigo- Laboratório de Enerxía Solar-XI Congresso Ibérico e VI Congreso Ibero-Americano de Energia Solar-Algarve.

Vázquez, M., Santos J.M., 2003- *Preliminary análisis of the University of Vigo radiometric station data*, Proceedings of the ISES Solar World Congress 2003, P653, International Solar Energy Society, Gotenborg, Sweden.

Vázquez M., F. Fernandes, J. Santos and T. Prado, 2004- *Determinación de la irradiación global diaria a partir de un mínimo de valores da irradiancia a lo largo del día*, Actas del XII Congreso Ibérico y VII Congreso Iberoamericano de Energía Solar, pp. 1171-1176, Asociación Española de Energía Solar, Vigo, España.

Vázquez, M. Santos J.M, Prado, M.T., Vázquez, D., Fernandes F., 2005 -*Atlas de Radiación Solar de Galicia*. Universidade de Vigo- Laboratório de Enerxía Solar.  
I.S.B.N. 84-609-7101-5

Vázquez M., J. M. Santos, M. T. Prado and D. Vázquez. Comparing several proceedings of estimating the available solar radiation, with data measured in University of Vigo radiometric

station. Proceedings of the Ises Solar World Congress 2005. Resource, Assesments Fundamentals, International Solar Energy Society, Orlando, Florida, USA2005

Vazquez M., C. Magro, and P. Izquierdo. Evaluation of the Solar Photovoltaica Energy Potencial in six Climat Areas of the Madeira Archipelago (Portugal). Proceedings of the Solar World Congreso 2007 (SWC 2007), Interntional Solar energy Society, Beijing, China 2007.

Virgens, J.S., Caetano, A., (200?) - *Modelo computacional para simulação da radiação solar global diária* - FCA/UNESP – SP – Brasil.

Yang, Hongxing, Lin, L., Zhou, W., 2006 - *A noveyl optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system*-Renewable Energy Research Group-The Hong Kong Polytechnic University. Solar Energy xxx (2006).

Zilles, R. ; Lorenzo, E. , 1999 - *Degradación de la característica I-V en módulos de silicio amorfo expuestos a la radiación solar*

**ANEXOS**

---

Tabela I. Características técnicas das instalações híbridas (FV-E) do LREC

<b>INSTALAÇÕES HÍBRIDAS</b>	<b>DESERTA 1</b>	<b>DESERTA 2</b>	<b>FANAL</b>	<b>ESTANQUINHOS</b>	<b>CASA do BURRO</b>
<b>AEROGERADOR</b>	2000		FFSolar2002	Ecoatlantico2000	2007
Marca	Windseeker	Windseeker	Bornay	Whisper 500	Southwest Windpower
Modelo	502	502	Inclin 1500 Neo		Air 403
Potência nominal W	500	500	1500	400	400
Tensão nominal V	24	24	24/48	24	24
Numero de pás	3	3	2		3
Diâmetro da turbina m			2.86		
Velocidade nominal m/s			12		12,5
Velocidade de arranque m/s			3.5		3
Altura acima do solo m	9	9	12	10	10
Regulador			150 A/24V/Imanes	c/ Regulador	c/Reg c/Alternador
<b>GERADOR PV</b>					
Potência totalWp	1232	1232	640	1200	1280
Área m2	16x0.73=11.68	16x0.73=11.68	8x0.58=4.64	16x0.62=9.92	16X0.63=10.08
Numero de módulos	16	16	8	16	16
Tipo de Material	Policristalino	Policristalino	Policristalino	Policristalino	Multicristalino
Marca e Modelo	Solarex MSX77	Solarex MSX77	BP Solar 380	BP Solar 275	Kyocera Kc80
<b>BANCO BATERIAS</b>					
Numero de Vasos	12x2V	12X2V	12x2V	12x2V	12x2V
Capacidade Ah	2000	1200	1500 (100h)	750	1500
Tensão	24 V	24	24	24	24
Marca e Modelo	12Opzs1200	12Opzs1200	BP Solar Powerblocs	BP Solar Powerblocs	Hoppecke Opzs1000
<b>REGULADOR DE CARGA</b>					
Marca e Modelo	PS30	Trace C35+DVM	Trace C35+DVM	Solarix Theta	MorningstarPS30M
Tensão V	24	24	24	24	24
Corrente A	30	30	30	30	30
Numero de reguladores	2	2	1	2	2
<b>INVERSOR</b>					
Entrada V DC	24	24	24	24	24
Saída V AC	230	230	230	220	230
Frequência Hz	50	50	50	50	50
Potência W	3300	3300	2300	2400	2300
Marca e Modelo	Trace SW303	Trace	Studer	Trace DR 2424	Studer

LREC-DHTE

Tabela II. Características das instalações fotovoltaicas do LREC

<b>INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS</b>	<b>SELVAGEM I</b>	<b>SELVAGEM II</b>	<b>P.S.LOURENÇO</b>	<b>BICA DA CANA</b>	<b>SELVAGEM P.</b>
<b>GERADOR PV</b>					
Potencia total Wp	TELEXTRÓNICA 720	ECOATLANTICO 1200	TELEXTRÓNICA 616	FF Solar 1600	TELEXTRÓNICA 256
Área m2	12x0.47=5.7	16X0.62=9.92	8x0.73=5.84	20x0.58=11.6	4x0.55=2.22
Numero de módulos	12	16	8	20	4
Tipo de Material	Policristalino	Policristalino	Policristalino	Policristalino	Policristalino
Marca	Solarex	BP Solar	Solarex	BP Solar	Solarex
Modelo	MS 60	BP 275	MS 77	BP 380	MS 64
<b>BANCO BATERIAS</b>					
Numero de Vasos	12x2V	12 x2 V	12x2V	12x2V	2Baterais S/manut
Capacidade Ah	600 (10h)	650	630 C100h	1500	2x180
Tensão	24 V	24	24	24	12
Marca		Fulmen	Hoppecke	BP Solar	Dryfit
Modelo	6OPZ 600		6OPZ 420	Powerblocc	A-400
<b>REGULADOR DE CARGA</b>					
Tensão V	12 e 24	24	12	24	12
Corrente A	30	30	30	30	30
Numero de reguladores	2	2		2	1
Tipo	PS 30M	SOLARIX THETA	ABS 30/24	C35 + DVM	VRX 25 24
Marca				Trace	Solarex
<b>INVERSOR</b>					
Entrada V DC	24	24	12	24	
Saída V AC	230	220	230	230	
Frequência Hz	50	50	50	50	
Potência W	3300	1500	1500		
Marca	Trace	Trace	Trace		
Modelo	DR 1524E	DR 2424E	DR1512		

Tabela III. Características técnicas das instalações fotovoltaicas do LREC

INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS	FUNDURAS	TORRE F. BISPO	TORRE P. SUNA	BUGIO	S.MARTINHO 2	Terra Chã P. Santo
<b>GERADOR PV</b>						
Potência Wp	1600	500	500	500	500	500
Área m2	20x0.63=12.72	4x.923=3.69	4x.923=3.69	4x.923=3.69	4x.923=3.69	4x.923=3.69
Nº.de módulos	20	4	4	4	4	4
Tipo de Material	Multicristalino	Multicristalino	Multicristalino	Multicristalino	Multicristalino	Multicristalino
Marca	Kyocera	Kyocera	Kyocera	Kyocera	Kyocera	Kyocera
Modelo	KC80	KC125-2	KC125-2	KC125-2	KC125-2	KC125-2
<b>BANCO BATERIAS</b>						
Nº. de Vasos	12x2V	4x12V	4x12V	4x12V	4x12V	4x12V
Capacidade Ah	2000 Ah	180 Ah	180 Ah	180 Ah	180 Ah	180 Ah
TensãoV	24	24	24	24	24	24
Marca	Hoppecke	Varta	Varta	Varta	Varta	Varta
Modelo	Opz1200	180	180	180	180	180
<b>REGULADOR DE CARGA</b>						
Tensão V	12_24	12_24	12_24	12_24	12_24	12_24
Corrente A	30	30	30	30	30	30
Nº.de reguladores	2	1	1	1	1	1
Marca	Morningstar	Morningstar	Morningstar	Morningstar	Morningstar	Morningstar
Modelo	PS30M	PS30M	PS30M	PS30M	PS30M	PS30M
<b>INVERSOR</b>						
Entrada V DC	24	12	12	12	12	12
Saída V AC	230	230	230	230	230	230
Frquencia Hz	50	50	50	50	50	50
Potência W	3300	450	450	450	450	450
Marca	Studer	Alessi	Alessi	Alessi	Alessi	Alessi

LREC-DHTE

Tabela IV. Características técnicas das instalações fotovoltaicas do LREC

INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS	S. MARTINHO	COVA GRANDE	PRAZERES	TERRA CHÃ	ILHÉU CHÃO
<b>GERADOR PV</b>					
	FFSolar	FFSolar 2002/6	FFSolar	Telextrónica	Telextrónica
Potencia Wp	1280	1280	1280	500	256
Área m2	16x0.58=9.38	16x0.58=9.38	16x0.58=9.38	4x0.87=3.48	4x0.48=1,93
Nº.de módulos	16	16	16	4	4
Tipo de Material	Policristalino	Policristalino	Policristalino	Policristalino	Policristalino
Marca	BP Solar	BPSolar	BPSolar	Kyocera	Solarex
Modelo	380U	380U	380U	KC125-2	
<b>BANCO BATERIAS</b>					
Nº.de Vasos/Baterias	12x2V	12x2V	12x2V	4xBateriasx12V	2xBateriasx12V
Capacidade Ah	1200 (100 h)	1200	1200 (100 h)	180	180
Tensão V	24	24	24	24	24
Marca	BP Solar	BP Solar	BP Solar	Varta	Varta
Modelo	Powerblocs	Powerblocs	Powerblocs	180	180
<b>REGULADOR DE CARGA</b>					
Tensão V	24	24	24	24	24
Corrente A	30	30	30	30	30
Nº.de reguladores	2	2	2	1	1
Marca	Trace	Trace	Trace	Morningstar	Morningstar
Modelo	C 35 + DVM	C 35 + DVM	C 35 + DVM	PS30M	PS30M
<b>INVERSOR</b>					
Entrada V DC	24	24	24	12	12
Saída V AC	230	230	230	230	230
Frequência Hz	50	50	50	50	50
Potência W	3300	3300	3300	450	450
Marca	Studer	Studer	Studer	Alessi	Alessi
Modelo	SI 2324twinpower	SI 2324twinpower	SI 2324twinpower	550i-12	550i-12

LREC-DHTE