

# Estudo da Abordagem *Well Being* para a Análise de Fiabilidade de Sistemas Isolados de Energias Renováveis

Luís Rodrigo Rocha de Pires Oliveira  
Marta Sofia Miranda Fernandes  
LEEC 2005/2006

621.3(047.3)/  
LEEC  
2006/OLII

Inovação  
010 Programa Operacional Ciência e Inovação 2010  
PRINCÍPIOS, OBJETIVOS, AÇÕES E INSTRUMENTOS DE APOIO



92 86

# Estudo da Abordagem *Well Being* para a Análise de Fiabilidade de Sistemas Isolados de Energias Renováveis

Luís Rodrigo Rocha de Pires Oliveira  
Marta Sofia Miranda Fernandes  
LEEC 2005/2006

92 86



Ciência, Inovação  
2010  
Programa Operacional Ciência e Inovação 2010  
PROTECÇÃO AMBIENTAL, ENERGIA E SUSTENTABILIDADE



Universidade do Porto  
Faculdade de  
Engenharia  
FEUP



INESC PORTO  
INSTITUTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS  
E ENERGIA DO PORTO



**Ciência. Inovação**  
**2010**

**Programa Operacional Ciência e Inovação 2010**  
PROTECTORADO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS



Universidade do Porto  
**FEUP** Faculdade de  
Engenharia



**INESC PORTO**  
INSTITUTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS  
E COMPUTADORES DO PORTO

821-310473) Lee 206/011

104969

24 02 10

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores – Ramo de  
Sistemas de Energia



**FEUP**

**Estudo da abordagem *well being* para  
a análise de fiabilidade de sistemas  
isolados de energias renováveis**

Projecto de Final de Curso de:

**Luís Rodrigo Rocha de Pires Oliveira  
Marta Sofia Miranda Fernandes**

## Resumo

Neste documento descreve-se, essencialmente, as metodologias de cálculo aplicadas na geração de séries de vento e de séries de sol com o intuito de proceder ao estudo e à análise dos índices de fiabilidade para sistemas isolados de energias renováveis. Os índices de fiabilidade fazem parte do projecto "*Design of Demand Analysis Module*" da autoria de Cláudio Monteiro e de António Oliveira, inserido no projecto RISE (*Renewables for Isolated Systems*).

No decorrer deste projecto, testamos e validamos os índices de fiabilidade referidos, recorrendo à implementação e análise de sistemas virtuais, nos quais usamos as séries geradas também no decorrer deste projecto. Estes sistemas virtuais podem ser considerados casos de estudo podendo ser adaptados às mais diversas situações desejadas.

...há um grau de incerteza associado à produção das renováveis e, esse sim, é um desafio à engenharia descobrir a fiabilidade dessas energias...

<b>ÍNDICE</b>	<b>pág.</b>
1 Introdução .....	7
2 Descrição do Projecto .....	9
2.1 Objectivo.....	9
2.2 Sistemas eólicos isolados.....	10
2.2.1 Caracterização das tecnologias e recursos .....	10
2.2.1.1 Variações Anuais.....	11
2.2.1.2 Variações Sazonais.....	11
2.2.1.3 Variações Diárias .....	12
2.2.1.4 Variações de Curta Duração.....	13
2.2.1.5 Aerogerador .....	19
2.2.1.6 Baterias.....	19
2.2.1.7 Controlador de carga .....	20
2.2.1.8 Inversores.....	20
2.3 Séries de Vento.....	20
2.3.1 Procedimento .....	21
2.3.2 Conclusão.....	28
2.4 Sistemas Solares Isolados.....	29
2.4.1 Caracterização das tecnologias e recursos .....	29
2.4.1.1 Distribuição Temporal Da Radiação Solar.....	30
2.4.1.2 Módulo Fotovoltaico .....	42
2.5 Séries de Sol.....	44
2.5.1 Procedimentos .....	44



2.6	Sistemas Híbridos isolados.....	51
3	Índices de Fiabilidade e Bem Estar.....	52
3.1	Introdução.....	52
3.1.1	LOHP - Loss of Heath Percentage.....	52
3.1.2	LOHE - Loss of Heath Expectation.....	53
3.1.3	ASAI – Average service availability index.....	53
3.1.4	f(NH) – Frequency of NH state.....	53
3.1.5	LOHMD - Loss of Heath Mean Duration.....	53
3.2	Análise dos Índices.....	54
3.2.1	Sistema considerado.....	54
3.2.1.1	Carga:.....	54
3.2.1.2	Painéis Fotovoltaicos.....	55
3.2.1.3	Aerogerador.....	56
3.2.1.4	Baterias.....	57
3.2.1.5	Requisitos de "H".....	57
3.2.2	Metodologia de cálculo dos índices.....	58
3.2.3	Resultados.....	59
4	Conclusões.....	68
5	Bibliografia.....	71
6	Anexos.....	73
6.1	Anexo I – ENERGIAS RENOVÁVEIS – SITUAÇÃO ACTUAL.....	73
6.2	Anexo II - Séries.....	84
6.3	Anexo III – Visual Basic.....	86

6.4	Anexo IV - Tabelas.....	95
6.5	Anexo V – Radiação Extraterrestre .....	96

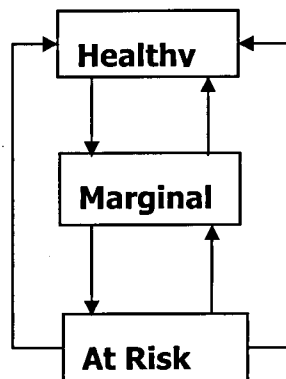
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>pág.</b>
Figura 1 – Ventos Globais. ....	14
Figura 2 – Influência de obstáculos.....	15
Figura 3 – Influência do relevo. ....	15
Figura 4 – Influência da rugosidade do terreno. ....	16
Figura 5 – Classes de rugosidade.....	16
Figura 6 – Brisa Marinha durante o dia. ....	17
Figura 7 – Brisa Marinha durante a noite.....	17
Figura 8 – Ventos das montanhas.....	17
Figura 9 – Sistema Eólico Isolado. ....	19
Figura 10 – Exemplo de probabilidades de transição.....	23
Figura 11 – Espectro solar.....	29
Figura 12 – Radiação solar durante 11 anos.....	31
Figura 13 – Plano da Elíptica. ....	32
Figura 14 – Sistema Horizontal.....	35
Figura 15 – Radiação solar Total.....	40
Figura 16 – Sistema Híbridos Isolados.....	51

## 1 INTRODUÇÃO

A fiabilidade dos sistemas isolados de Energias Renováveis é algo que tem vindo a ser alvo de estudo, devido às intermitências das suas fontes, tais como: o vento e a radiação solar. Estes elementos serão estudados neste projecto, em relação à sua intermitência, para nos permitir tirar algumas conclusões em relação a índices de fiabilidade que possam ser aplicados a este tipo de sistemas.

No dimensionamento de sistemas isolados utilizam-se técnicas deterministas que dificilmente incluem incerteza e portanto não permitem uma avaliação apropriada da fiabilidade altamente influenciada pela intermitência do recurso renovável. Por outro lado o próprio conceito de fiabilidade para consumidores de sistemas isolados não se restringe ao conceito de continuidade e qualidade de serviço típico da fiabilidade de redes eléctricas, mas baseia-se essencialmente em requisitos de fiabilidade que poderão ser a base para o dimensionamento de sistemas isolados. É neste conceitos, intermitência de recurso e flexibilidade na definição de requisitos de fiabilidade que será estudada neste trabalho uma nova metodologia para avaliação da fiabilidade.

A base teórica para a metodologia seguida é o conceito de *well-being* [R. Billinton], que combina técnicas probabilísticas e determinísticas para definição da fiabilidade.



Uma aproximação do sistema *well Being* incorpora os seguintes estados:

- **Healthy** – um sistema opera neste ponto quando tem capacidade suficiente de reserva para ir de encontro ao critério determinístico especificado;
- **Marginal** – o critério determinístico é violado sem causar interrupção de carga;
- **At Risk** – a carga excede a capacidade disponível.

Com o grau de conforto associado à operação do sistema com a aceitação do critério determinístico é dada a probabilidade de residir no estado *Healthy*, que "poderá" ser usado como um índice do sistema isolado de energia renováveis.

Esta será a base do nosso estudo.

## 2 DESCRIÇÃO DO PROJECTO

Este projecto consiste na avaliação de fiabilidade de sistemas isolados de Energias Renováveis, onde o princípio base é o novo conceito de fiabilidade conhecido por *Well Being* apresentado por [R. Billinton].

O projecto aqui descrito está associado a um projecto europeu denominado por RISE (*Renewables for Isolated Systems - Energy Supply and Waste Water Treatment*), que tem como objectivo a investigação das possibilidades de utilização de Energias Renováveis, nomeadamente a energia solar, a eólica e a biomassa, bem como o biogás como produto do tratamento de águas residuais, para o fornecimento de para áreas isoladas.

### 2.1 OBJECTIVO

O objectivo geral da metodologia é proporcionar, a análise de fiabilidade em estudos e planeamento de sistemas isolados de Energias Renováveis tendo como base uma abordagem de *well-being*. Pretende-se, com esta ferramenta, ajudar os promotores de pequenos projectos a formular, dimensionar e avaliar soluções de tecnologias de produção descentralizada de energia (solar fotovoltaica e pequena eólica). Desta forma, o usuário poderá avaliar e comparar diversas configurações de tecnologias de Energias Renováveis, tendo em conta o critério de fiabilidade.

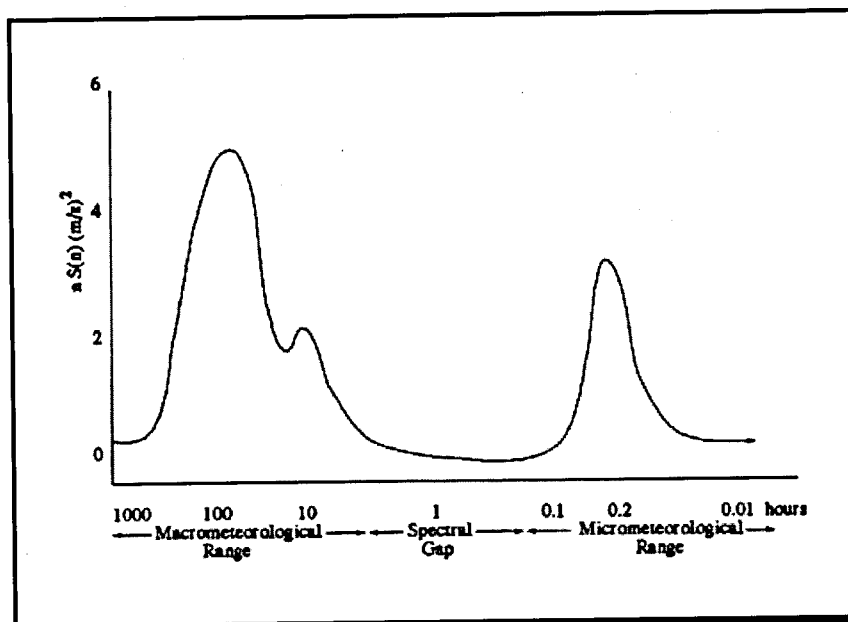
Neste trabalho segue-se uma metodologia que permite a modelização da fiabilidade de um sistema isolado. Por um lado a abordagem seguida permite integrar os fenómenos estocásticos associados à intermitência dos recursos. Por outro lado pretende-se integrar no processo de dimensionamento dos sistemas isolados a avaliação de fiabilidade como um pré-requisito definido pelo próprio consumidor. Para o dimensionamento dos sistemas surge como preocupação a comparação de diversas alternativas renováveis com características intermitentes, o que motivou a definição e estudo de novos índices, mais

apropriados para o dimensionamento de produção intermitente e armazenamento de energia característicos destes sistemas. Estes novos índices de fiabilidade foram modelizados com simulação de Monte-Carlo avaliando e comparando a fiabilidade dos diversos sistemas de ER (eólicos, solares, híbridos) e a correspondente sincronização entre consumos, produção e armazenamento. Para estas simulações foi necessário partir de séries temporais realistas de velocidades de vento e radiação solar. Para obter estas séries para mais de 20 anos de simulação foi necessário, numa primeira fase, o desenvolvimento de metodologias de sintetização de séries temporais baseados em vários tipos de modelos (ARIMA, cadeias de Markov, etc.). Por fim, numa última fase do trabalho, foram simulados e avaliados os diversos índices para três sistemas diferentes (eólico, fotovoltaico e híbrido) dimensionados para alimentar a mesma série temporal de consumos, predefinida para este caso de estudo. Também foram comparados os índices para os mesmos sistemas mas aplicados a dois requisitos de fiabilidade diferentes impostos pelo hipotético utilizador do sistema isolado.

## **2.2 SISTEMAS EÓLICOS ISOLADOS**

### **2.2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS E RECURSOS**

O vento é um fenómeno climatológico complexo, resultante da conjugação de efeitos e especificações, intervindo em distintas escalas temporais e espaciais. A sua correcta caracterização exige conhecimentos e técnicas específicas, quase sempre dependentes do objectivo pretendido.



**Gráfico 1** – Espectro da Energia do vento.

O aproveitamento do vento com fins energéticos é seguramente, a finalidade mais exigente do ponto de vista do rigor necessário à sua caracterização.

Do ponto de vista do aproveitamento da energia eólica, é importante distinguir os vários tipos de variações temporais da velocidade dos ventos, a saber: variações anuais, sazonais, diárias e de curta duração.

#### **2.2.1.1 VARIAÇÕES ANUAIS**

Para se obter um bom conhecimento do regime dos ventos não é suficiente basear-se na análise de dados de vento de apenas um ano; o ideal é dispor de dados referentes a vários anos. À medida que uma maior quantidade de dados anuais é colectada, as características levantadas do regime local dos ventos tornam-se mais fiáveis.

#### **2.2.1.2 VARIAÇÕES SAZONAIS**

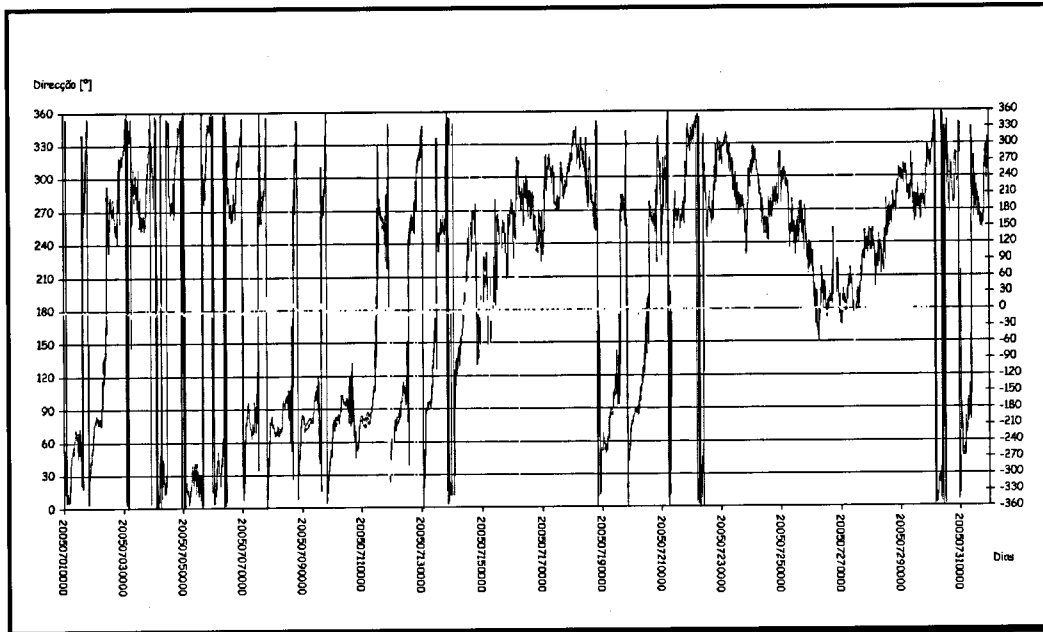
O aquecimento não uniforme da superfície terrestre resulta em significativas variações no regime dos ventos, resultando na existência de

diferentes estações do ano. Considerando que, em função da relação cúbica entre a potência disponível e a velocidade do vento (na altura do eixo da turbina), em algumas faixas de potência, uma pequena variação na velocidade implica numa grande variação na potência. Sendo assim, a utilização de médias anuais (ao invés de médias sazonais) pode levar a resultados que se afastam da realidade.

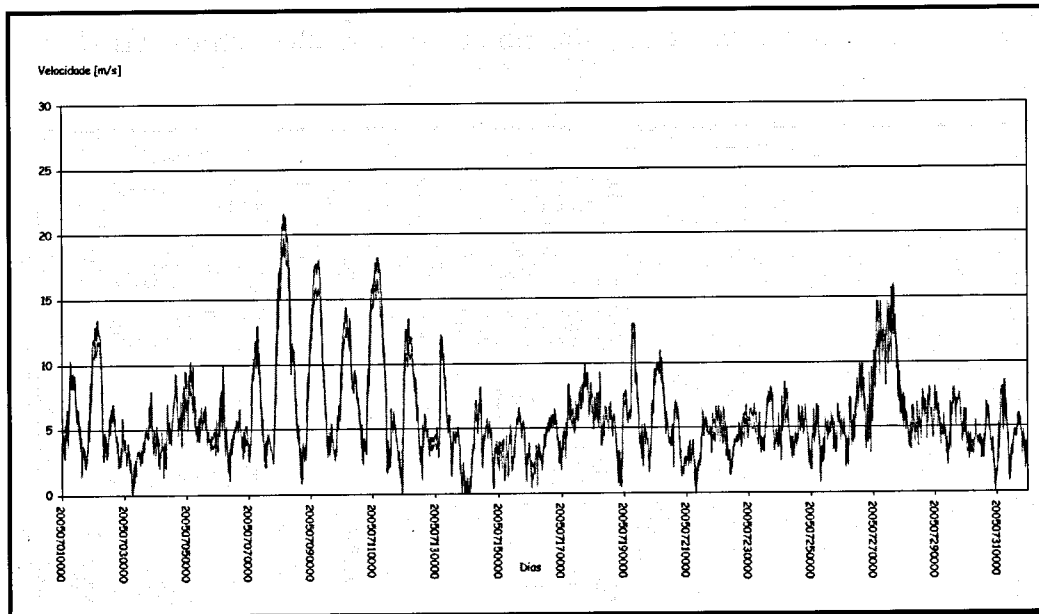
### **2.2.1.3 VARIAÇÕES DIÁRIAS**

As variações diárias na velocidade do vento (brisas marítimas e terrestres, por exemplo) também são causadas pelo aquecimento não uniforme da superfície da Terra. Essas variações são importantes quando, após a escolha de uma região, se procura o local mais adequado para a instalação do sistema eólico, dentro dessa área. Ao comparar a evolução da velocidade média ao longo do dia percebe-se que há uma significativa variação de um mês para os outros. Com esse tipo de informação pode-se projectar melhor o sistema eólico. Por exemplo, nos locais em que os ventos no período do dia são mais fortes do que os ventos no período da noite e a carga de pico ocorre durante o dia, a carga base pode ser fornecida pelo sistema existente e a carga adicional pelo sistema eólico. Entretanto, se a carga de pico ocorre durante a noite, provavelmente a necessidade será maior que o disponível e um sistema estocástico pode ser necessário.





**Gráfico 2 – Variabilidade da direcção do vento.**



**Gráfico 3 – Variabilidade da velocidade do vento.**

#### 2.2.1.4 VARIACÕES DE CURTA DURAÇÃO

As variações de curta duração estão associadas tanto às pequenas flutuações quanto às rajadas de vento. Num primeiro momento, essas variações

não são consideradas na análise do potencial eólico de uma região, desde que não assumam grandes proporções. As flutuações e a turbulência do vento podem afectar a integridade estrutural do sistema eólico, devido à fadiga que ocorre especialmente nas pás da turbina. Por outro lado, as rajadas, caracterizadas por aumentos bruscos de curta duração da velocidade do vento, geralmente acompanhadas por mudanças de direcção, merecem maior atenção.

Podemos classificar os seguintes tipos de vento:

- **Ventos globais** – ventos que sobem desde o Equador para os pólos, os quais circulam pelas camadas mais altas da atmosfera, por volta dos 30° de latitude, e que a força de Coriolis evita que continuem em direcção aos pólos. Nessa latitude encontra-se uma zona de altas pressões, pelo que o ar começa a descer de novo. Quando o vento sobe desde o Equador origina uma zona de baixas pressões perto do solo o que atrai ventos do Norte e do Sul;

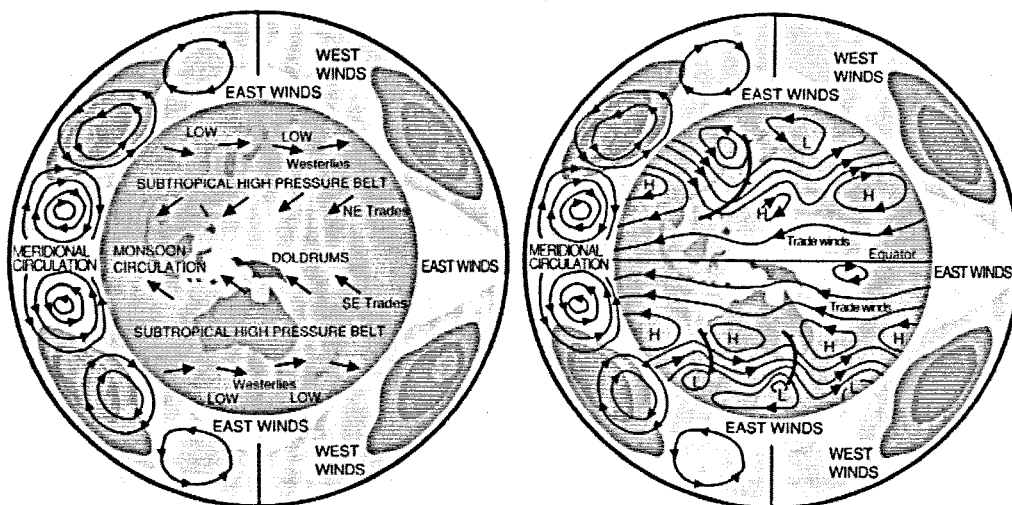


Figura 1 – Ventos Globais.

- **Ventos de superfície** – ventos influenciados pela superfície terrestre até altitudes de 100 metros, onde o vento é travado pela

rugosidade da superfície da terra e pelos obstáculos com que se depara;

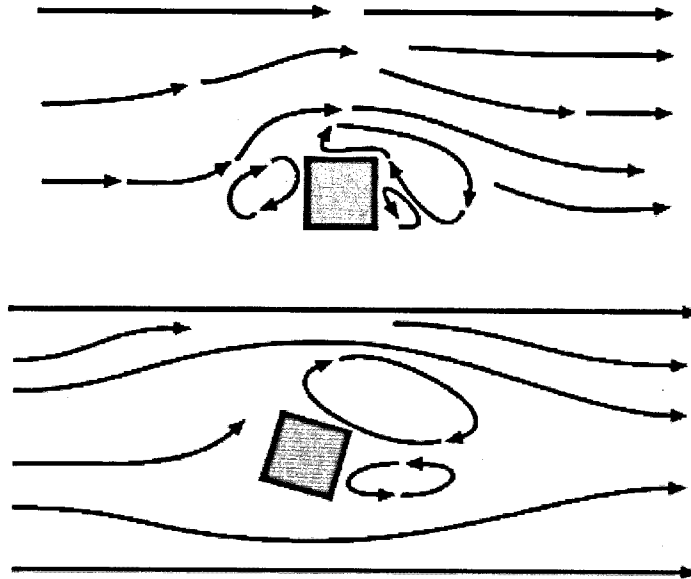


Figura 2 – Influência de obstáculos.

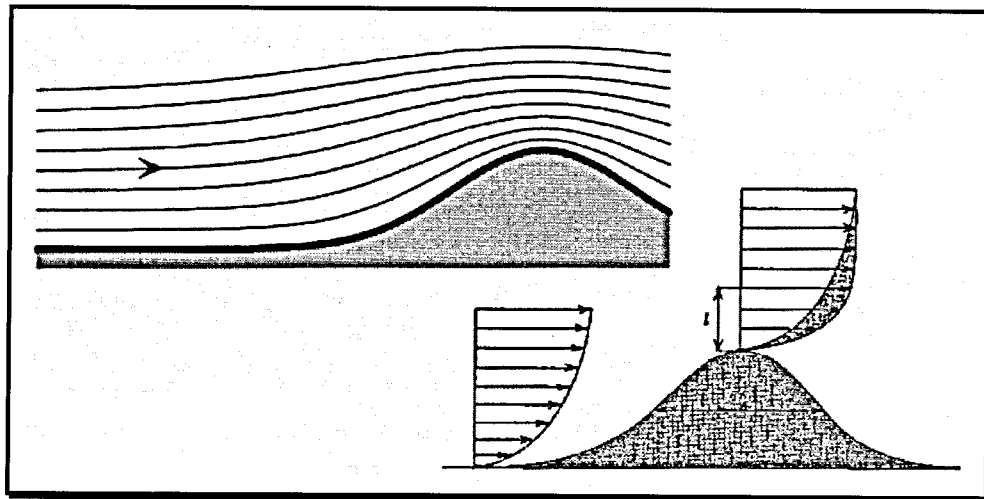


Figura 3 – Influência do relevo.

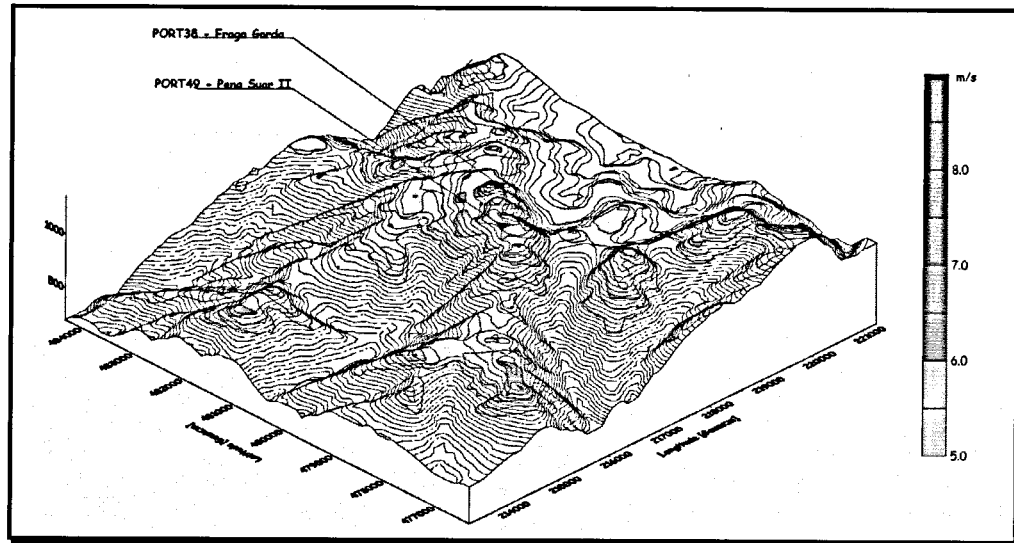


Figura 4 – Influência da rugosidade do terreno.

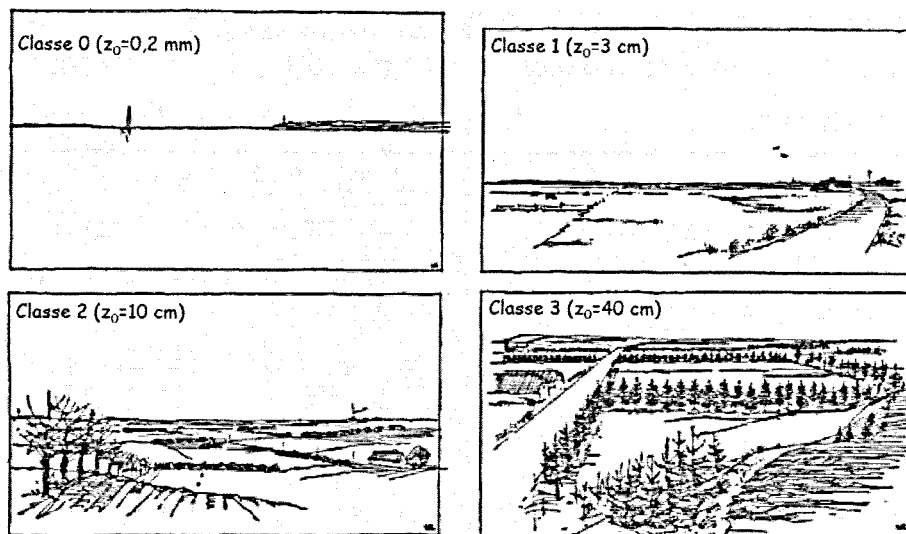
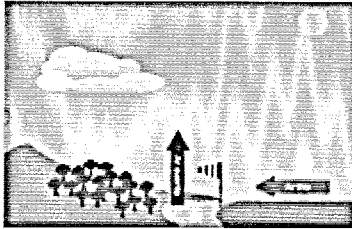


Figura 5 – Classes de rugosidade.

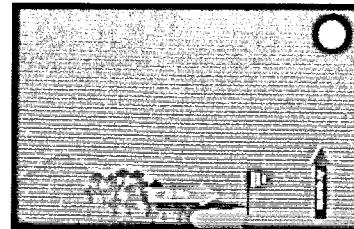
o **Ventos locais:**

- **Brisas Marinhas:** Durante o dia, pela influência do sol, a terra aquece mais rapidamente que o mar. O ar sobe e circula para o mar, criando uma depressão ao nível do solo que atrai o ar frio do mar. A isto chama-

se brisa marinha. Normalmente ao entardecer há um período de calma, quando as temperaturas do solo e do mar são semelhantes. Durante a noite os ventos sopram em sentido contrário, tendo a brisa terrestre, normalmente, velocidades inferiores, uma vez que a diferença entre a temperatura do solo e do mar é menor;

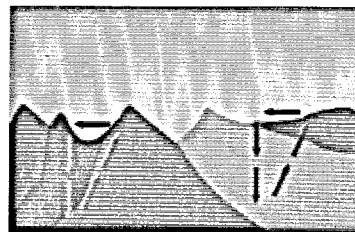


**Figura 6** – Brisa Marinha durante o dia.



**Figura 7** – Brisa Marinha durante a noite.

- Ventos da montanha: tendo como exemplo o vento do vale, o qual tem origem nos declives orientados a sul (no hemisfério sul nos declives orientados a norte). Quando os declives e o ar próximo deles está quente a densidade do ar diminui, subindo e seguindo a superfície destes. Durante a noite a direcção do vento inverte-se, passando então a descer. Se o fundo do vale for inclinado, o ar pode ascender e descender pelo vale, efeito a que se dá o nome de "vento canhão".



**Figura 8** – Ventos das montanhas.

A direcção do vento é influenciada pela soma dos efeitos globais e locais. As direcções dominantes são importantes na localização dos aerogeradores, no entanto a geografia local também pode influenciar como vimos a cima.

Visto o eixo da Terra ter uma inclinação de  $23,5^\circ$  em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, vão ocorrer variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra, que resultam em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos, em qualquer local da superfície terrestre. Como resultado surgem os ventos continentais ou periódicos que compreendem as monções e as brisas. As monções são ventos periódicos que mudam de direcção a cada seis meses aproximadamente. Em geral, as monções sopram numa determinada direcção, numa dada estação do ano e em sentido contrário na estação seguinte. Ver Figura 13.

Os pequenos sistemas de energia eólica (utilizados em sistemas isolados) delimitam uma gama de potências entre 25 W e 25 kW e são usados para carga de baterias, bombagem de água, aquecimento,... sendo os mais bem sucedidos os sistemas de carga de pequenas baterias, usando turbinas com diâmetro de rotor de 1 a 3 m.

O elemento principal de um sistema eólico é o Aerogerador, sendo o de eixo horizontal o mais utilizado em Portugal. O seu funcionamento é o seguinte: a turbina captura a energia cinética do vento, convertendo esta num binário actuando sobre as pás do rotor. Actualmente a maior parte destes são constituídos com três pás, no entanto é possível e existem com duas e apenas uma pá. A principal desvantagem destas turbinas, com duas ou uma pá, é a menor estabilidade da turbina.

A turbina é montada numa torre para aumentar o seu rendimento, uma vez que a quantidade de energia transferida ao rotor pelo vento depende da densidade do ar, da área de varrimento do rotor e da velocidade do vento. Logo, neste último caso, quanto maior a força do vento mais energia será produzida.

Os sistemas eólicos isolados baseiam-se no esquema apresentado:

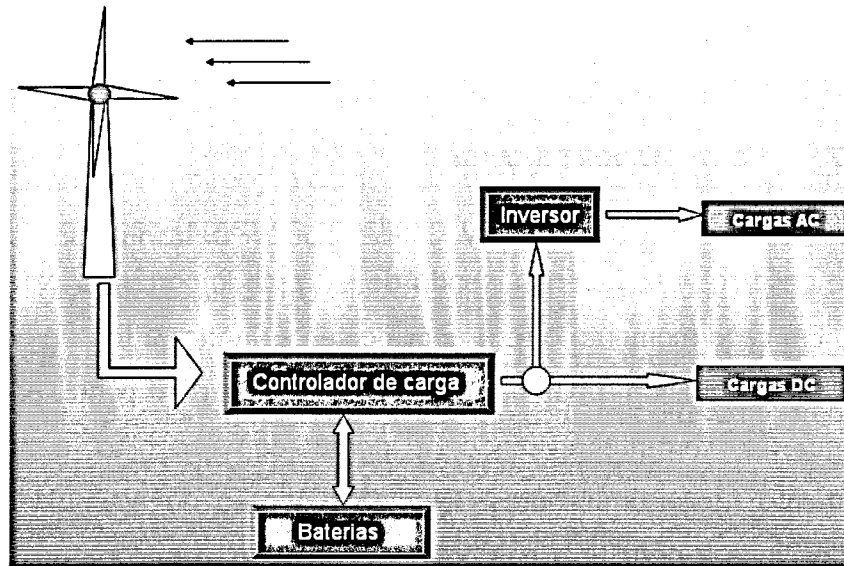


Figura 9 – Sistema Eólico Isolado.

Os componentes utilizados neste tipo de sistemas são:

#### 2.2.1.5 AEROGERADOR

O aerogerador é o componente do sistema eólico responsável por captar a energia cinética dos ventos e transformá-la em energia mecânica de rotação. É o componente mais importante de um sistema eólico. Por este motivo, a sua configuração influenciará directamente o rendimento global do sistema.

#### 2.2.1.6 BATERIAS

Num sistema isolado é necessário alimentar as cargas quando tal é exigido e não apenas quando existe vento. São então necessárias baterias que servem como dispositivos de armazenamento de energia para que esta possa ser produzida numa dada altura e utilizada quando a carga assim o exigir.

Devido à natureza variável do recurso eólico, as baterias deverão ser capazes de atravessar vários ciclos de carga e descarga sem se danificarem. As baterias mais usadas para os sistemas eólicos são baterias de chumbo (ácidas). As baterias de cádmium níquel (alcalinas) só são utilizadas em locais com

condições climáticas adversas ou em locais em que é necessário grande fiabilidade.

### **2.2.1.7 CONTROLADOR DE CARGA**

O controlador de carga (ou regulador de carga) serve para controlar a carga e descarga das baterias, sendo de extrema importância para a vida útil destas. Em cada momento o regulador de carga verifica a tensão aos terminais das baterias e quando a bateria se encontra carregada o controlador de carga interrompe a corrente evitando a perda de electrólito e um possível aquecimento nos acumuladores. Quando a tensão do acumulador desce, o regulador volta a permitir a passagem de corrente. A maioria dos reguladores dispõe de um alarme que informa quando é atingido o nível mínimo de tensão na bateria, desligando cargas quando tal acontece até que o nível de tensão suba.

### **2.2.1.8 INVERSORES**

A função dos inversores é de converter a corrente DC, proveniente dos módulos fotovoltaicos ou das baterias, em corrente AC. A corrente AC é necessária para uma grande quantidade de cargas. As cargas alimentadas em corrente AC não necessitam de inversor, no entanto, por vezes são usados conversores DC-DC para converter a tensão de saída noutra valor que corresponde ao funcionamento da carga.

## **2.3 SÉRIES DE VENTO**

A disponibilidade da energia do vento depende da sua velocidade, que diariamente não segue um padrão e é variável.

Duas características do vento, a sua direcção e velocidade, são utilizadas para descrever e para prever o tempo (meteorologia). A velocidade do vento é medida com um instrumento chamado anemómetro, que pode ser de diversos



tipos, sendo o mais comum o anemómetro mecânico. A direcção do vento é medida com um cata-vento, muito semelhante ao que normalmente vemos no cimo dos campanários, mas acoplado a um sistema de posicionamento que nos permite determinar a direcção cardeal do vento. Devemos ter em consideração que, para monitorizar a velocidade do vento num área grande, como um parque eólico, é necessário uma matriz complexa de anemómetros.

A velocidade do vento é um elemento essencial para avaliar o potencial eólico do local, tendo uma relação cúbica com a potência gerada, sendo imprescindível para avaliar o potencial eólico de um local.

O vento local é normalmente descrito pela média da velocidade em cada mês e pela média anual. As variações da velocidade do vento, num período, podem ser descritas por uma função de distribuição de probabilidades.

Como o vento muda em função do sol e das estações do ano, iremos então obter um padrão que normalmente se repete pelo período de um ano.

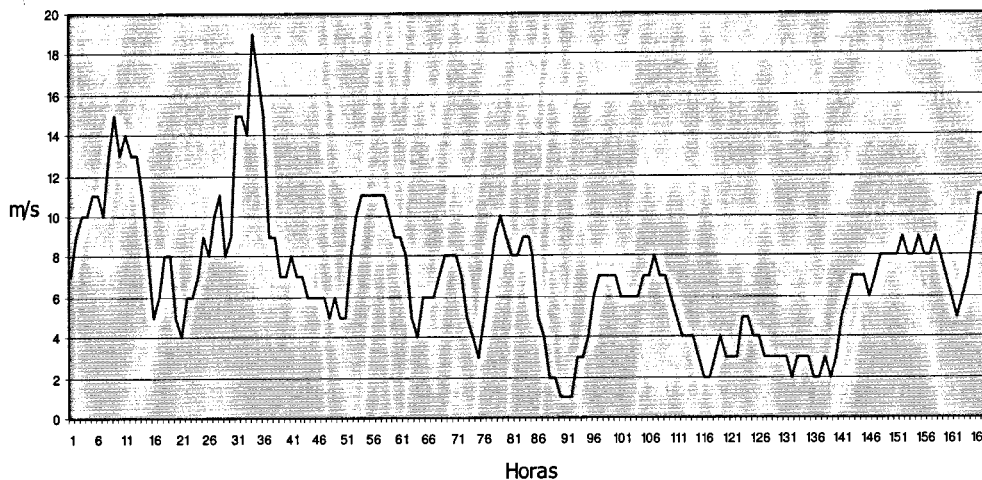
### **2.3.1 PROCEDIMENTO**

Neste ponto é nosso objectivo a criação de séries, representativas de diversos anos de vento, tendo como único dado as medições efectuadas nesse mesmo local, ao longo de um ano, descrevendo a seguir o procedimento adoptado.

Devemos ter em consideração que as séries “geradas” seguem um princípio de criação aleatório, tendo como únicas entradas: um valor inicial e os dados probabilísticos retirados da série real, devendo obter no final uma série que se possa considerar credível!

A série real, medida no local em estudo, ao longo de um ano e que nos foi fornecida está representada no apresentado em anexo, mas do qual retiramos um excerto (Gráfico 4) referente a uma semana para que a interpretação dos procedimentos adoptados se torne mais fácil!

**Valores Reais para uma semana**



**Gráfico 4 – Valores para uma semana da Série Real.**

Inicialmente foi feita uma análise da série real para determinar em que altura do ano havia maior concentração de períodos com perda de carga. Para esse efeito foi utilizada uma folha de cálculo bastante simples, considerando um consumo constante, e uma bateria, para determinar hora a hora se houve perda de carga. O resultado obtido está representado no gráfico 5, no qual podemos observar que há uma maior concentração de períodos com perda de carga no intervalo [3326;6139]. Tendo em conta estes resultados, decidimos efectuar a análise da série real dividindo-a em dois semestres, correspondendo o primeiro ao intervalo [3201;7580] e o segundo ao intervalo  $\{[7581;8760] \cap [0001;3200]\}$ . Por isso os seguintes procedimentos foram efectuados para cada um dos semestres.

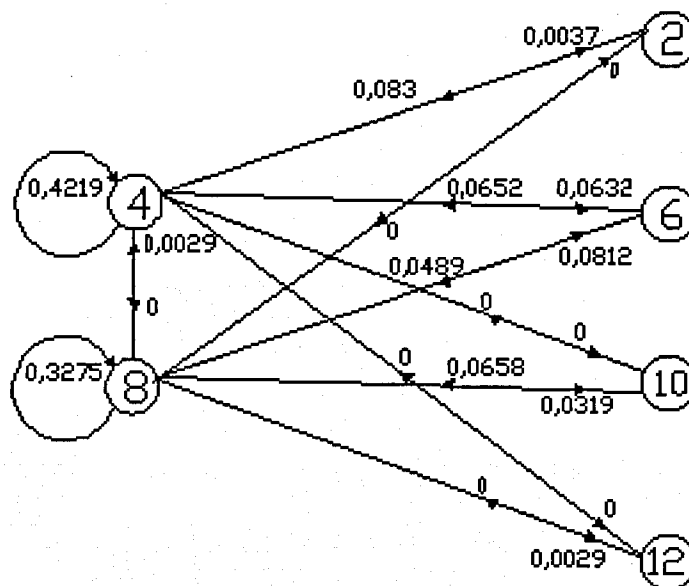
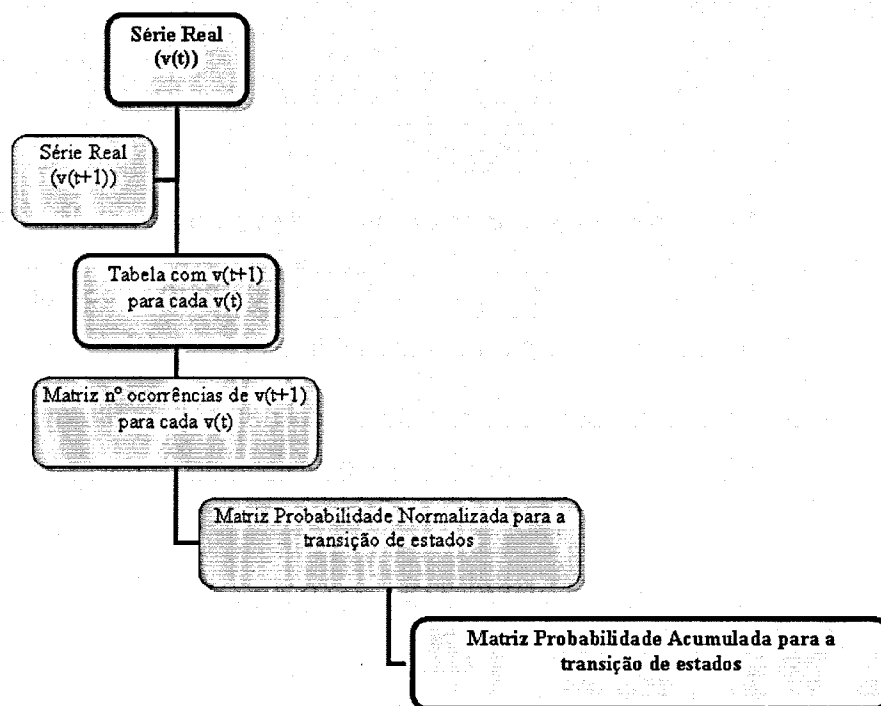


Figura 10 – Exemplo de probabilidades de transição.



Todos estes cálculos foram efectuados usando as funcionalidades do Visual Basic e do Excel.

De seguida implementou-se um programa em Visual Basic que "gera" uma série partindo de um valor inicial, definido, e de um aleatório que irá ser comparado com as probabilidades acumuladas para o valor anterior (neste caso o valor inicial definido) e assim sucessivamente até atingir os 4380 valores necessários para cada semestre.

O código do programa de VB pode ser consultado no anexo III.

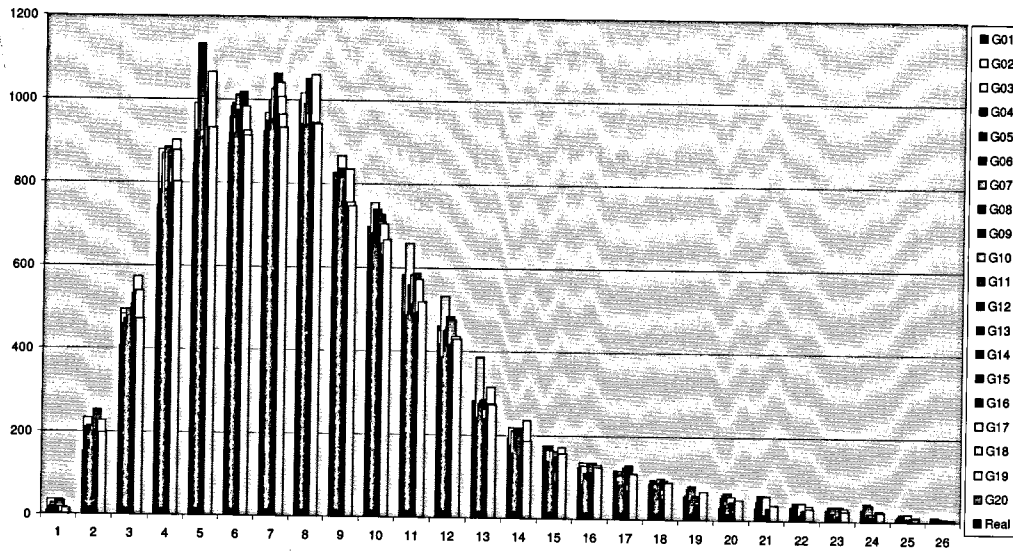
Finalmente reuniu-se os valores gerados para os dois semestres obtendo a série final.

Com o "gerador" de ventos concluído, geramos vinte séries que nos permitirão validar os resultados obtidos e também serem utilizadas posteriormente no nosso projecto. Para a sua validação foram efectuados os seguintes testes/analises:

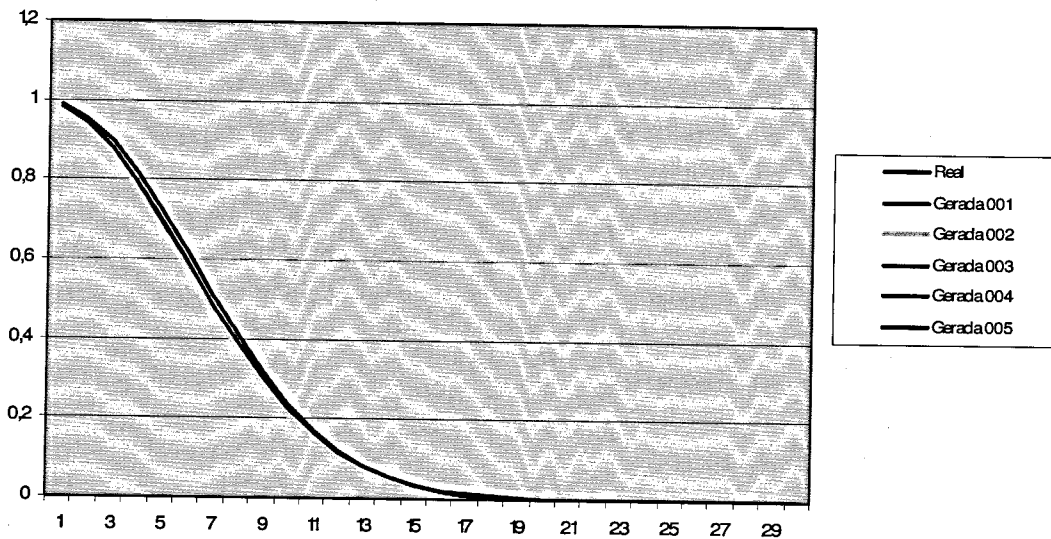
- Desvio padrão (ver resultados na Tabela 1);
- Média (ver resultados na Tabela 1);
- Numero de ocorrências por valor de vento (ver Gráfico 5);
- Desenho das curvas de Weibull, utilizando o SPSS para analisar os dados e o Excel para gerar as curvas (ver Gráfico 6);
- Cálculo da percentagem de perda de carga, utilizando a folha de cálculo referida anteriormente no início deste capítulo (ver resultados na Tabela 1);
- Comparação visual (ver Gráfico 7).

	<b>DP</b>	<b>Media</b>	<b>%p.c.</b>
<b>Real</b>	4,143711	7,304452	9,24
<b>G01</b>	4,083889	7,503653	6,12
<b>G02</b>	4,194064	7,180594	9,39
<b>G03</b>	4,004395	7,159132	10,66
<b>G04</b>	4,328645	7,352283	8,09
<b>G05</b>	3,92316	7,508447	4,49
<b>G06</b>	4,342432	7,136416	11,55
<b>G07</b>	3,857657	7,058333	6,72
<b>G08</b>	3,97407	7,34258	5,98
<b>G09</b>	3,661129	6,74726	10,13
<b>G10</b>	3,941035	7,157877	7,55
<b>G11</b>	4,179634	7,340068	6,53
<b>G12</b>	3,843885	7,202397	6,4
<b>G13</b>	3,655964	6,979795	6,22
<b>G14</b>	3,977753	7,131963	7,92
<b>G15</b>	3,91063	6,975228	11,31
<b>G16</b>	3,735885	6,881963	7,02
<b>G17</b>	3,613548	6,971005	6,32
<b>G18</b>	3,752015	6,874429	12,17
<b>G19</b>	3,790692	6,843379	11,1
<b>G20</b>	4,174605	7,168265	12,11

**Tabela 1** – resultados do desvio padrão (DP), Média e percentagem de perda de carga para as 20 Séries Geradas e para a Série Real.



**Gráfico 5** – número de ocorrências por valor de vento para as 20 Séries Geradas e para a Série Real.



**Gráfico 6** – curvas de Weibull para 5 Séries Geradas e para a Série Real.

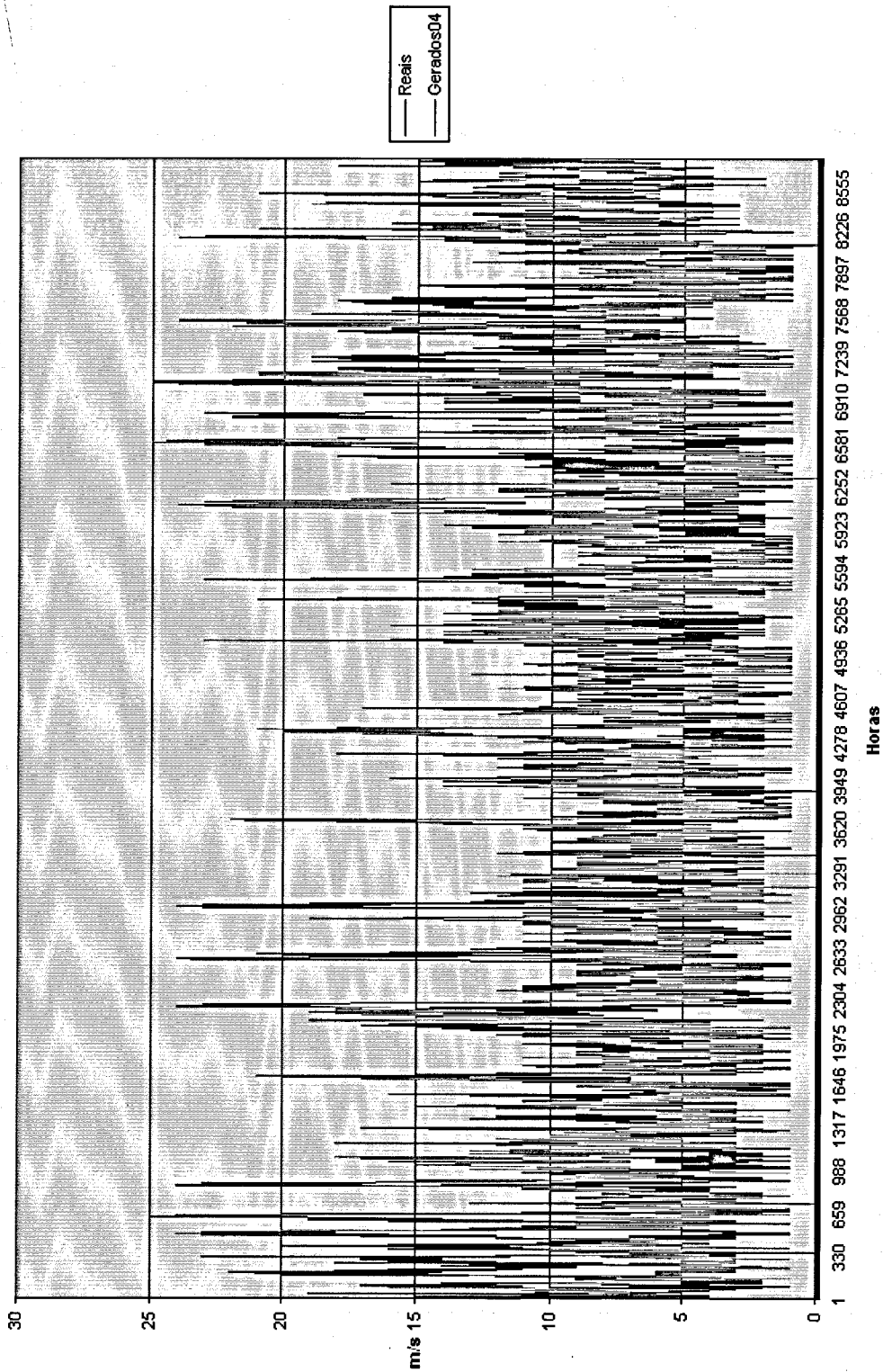


Gráfico 7 – comparação entre uma das Séries Geradas e a Série Real.

### 2.3.2 CONCLUSÃO

Obter uma distribuição com fiabilidade equivalente (através da análise de dados estatísticos como a média, desvio padrão e afins) é relativamente fácil. Mas como vimos a verificar numa análise mais detalhada, especificamente quando analisamos as tabelas de percentagem de transição entre valores (ver Tabela 1,2 e Figura 10), uma ligeira alteração pode resultar numa grande diferença quando está em causa o estudo de índices de fiabilidade. É essencialmente deste aspecto que deriva o facto de termos efectuado a análise para um elevado número de séries pois só assim conseguimos otimizar a convergência dos valores.



## 2.4 SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR

### 2.4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS E RECURSOS

A radiação solar é também como o vento um fenómeno climatológico complexo, resultante da conjugação de efeitos e especificações intervindo em distintas escalas temporais e espaciais. A sua correcta caracterização exige também conhecimentos e técnicas específicas, quase sempre dependentes do objectivo pretendido.

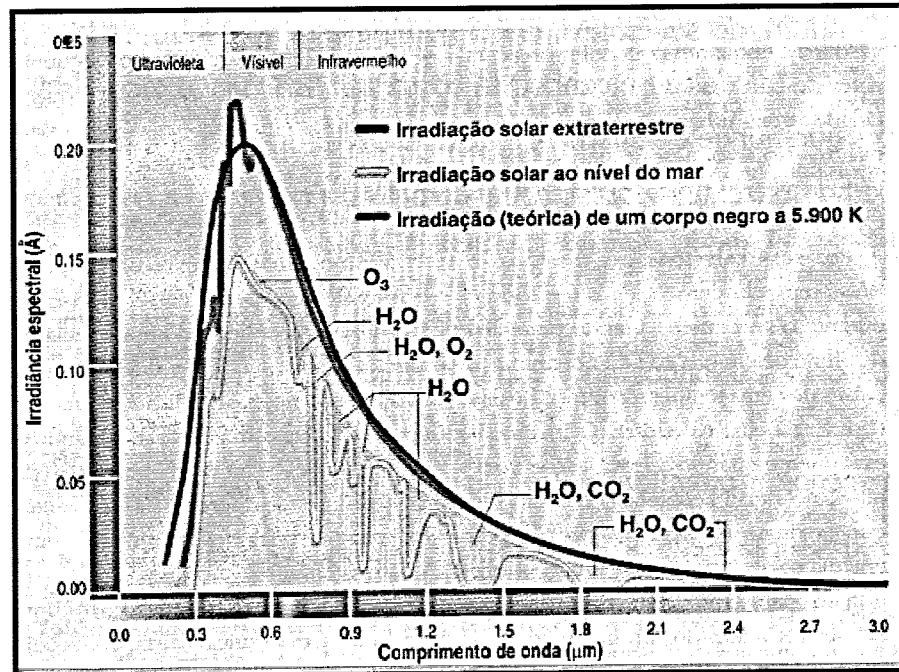


Figura 11 – Espectro solar.<sup>1</sup>

O espectro representa uma irradiância espectral. Irradiância é a potência por unidade de área (medida em  $w/m^2$ ). A curva acima é uma densidade espectral (irradiância por unidade de comprimento de onda:  $w/m^2.micron$ ).

<sup>1</sup> Fonte: *Ciência Hoje*.

O aproveitamento da radiação solar com fins energéticos é por ventura, a finalidade mais exigente do ponto de vista do rigor necessário à sua caracterização.

Aqui trataremos dos conceitos básicos para poder compreender como incide a radiação solar numa superfície terrestre.

#### **2.4.1.1 DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA RADIAÇÃO SOLAR**

A energia da radiação solar em qualquer localidade do planeta, depende da posição do sol no céu, independentemente de sua latitude, e é esta posição que define a altura do sol em relação aos observadores na superfície da Terra.

A altura do sol é máxima quando ela está no centro do céu por volta do meio-dia. Esta posição é conhecida como *zênite*. Quando o sol está no *zênite* a energia que atinge a superfície é máxima. À altura do sol é mínima quando ele se põe no horizonte, o *ocaso*. Quando o sol está no *ocaso* a energia que atinge a superfície é mínima.

O movimento aparente do sol e a latitude também definem a duração do dia. Os dias são longos no verão e curtos no Inverno. Assim, quanto maior o dia, maior é a quantidade de insolação recebida pela superfície e quanto menor o dia menor a quantidade de insolação recebida pela superfície. Pôr isso, o hemisfério de verão recebe mais energia solar que o de Inverno.

Do ponto de vista do aproveitamento da energia Fotovoltaica Eléctrica, é importante distinguir os vários tipos de variações temporais da radiação solar, a saber: variações anuais e sazonais, média diária e mensal.

##### **2.4.1.1.1 Variações anuais**

Como acontece com o vento para se obter um bom conhecimento do regime de variação de radiação solar não é suficiente basear-se na análise de dados de radiação de apenas um ano; o ideal é dispor de dados referentes a vários anos. Pois à medida que uma maior quantidade de dados anuais é

colectada, as características levantadas do regime local de radiação torna-se mais fiável.

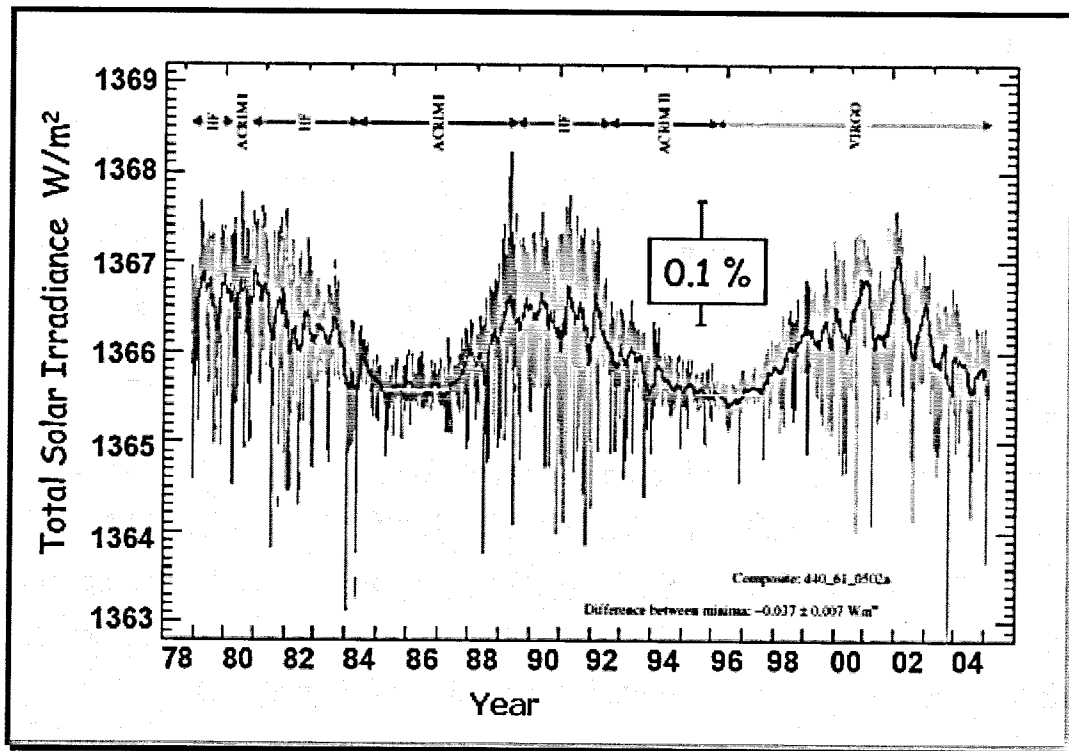


Figura 12 – Radiação solar durante 11 anos.

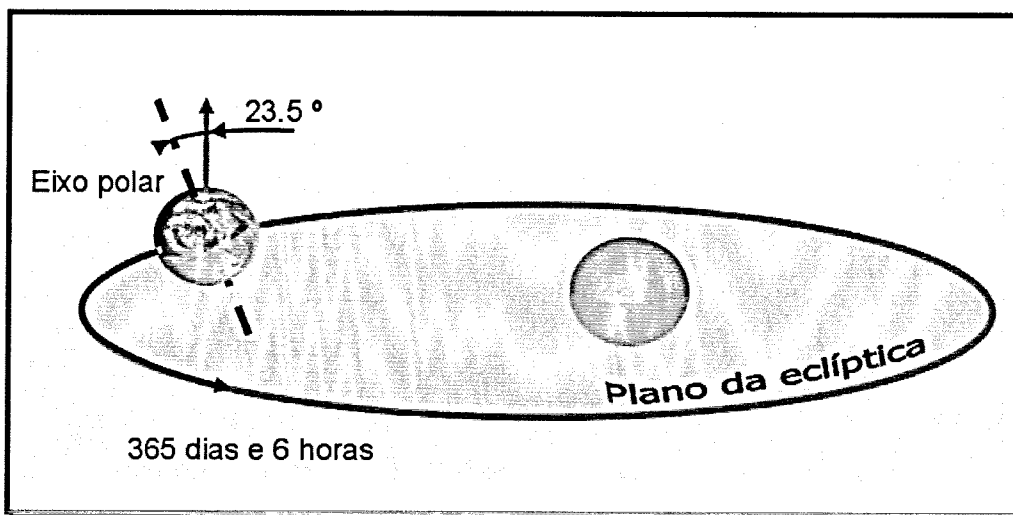
#### 2.4.1.1.2 *Variações Sazonais*

A radiação solar trata-se de um recurso que varia significativamente de acordo com a época do ano. Tendo como principal causa a situação geográfica terrestre em que nos encontramos (latitude), que depende da época do ano (distância Terra - Sol) e de numerosos factores atmosféricos e meteorológicos.

##### 2.4.1.1.2.1 *Distância Sol-Terra*

O valor da radiação solar que chega à Terra é inversamente proporcional ao quadrado da distância que separa o Sol. A Terra gira em torno do Sol numa

órbita elíptica, com o Sol situado num dos seus focos. O plano que contém esta órbita chama-se **plano da elíptica**.



**Figura 13** – Plano da Elíptica.

#### 2.4.1.1.2.2 Declinação solar

A terra gira sobre si mesma sobre um eixo central conhecido como **eixo polar**, à razão de uma volta por dia. O ângulo que este eixo forma com a normal ao plano da elíptica é constante e igual a  $23.5^\circ$  (Imagem 3). Este ângulo é a causa das estações do ano. Devido à inclinação do eixo da Terra, no Inverno os raios de Sol caem mais oblíquos sobre o plano do horizonte, devendo atravessar uma maior distância na atmosfera, aquecendo menos, e durante menos tempo.

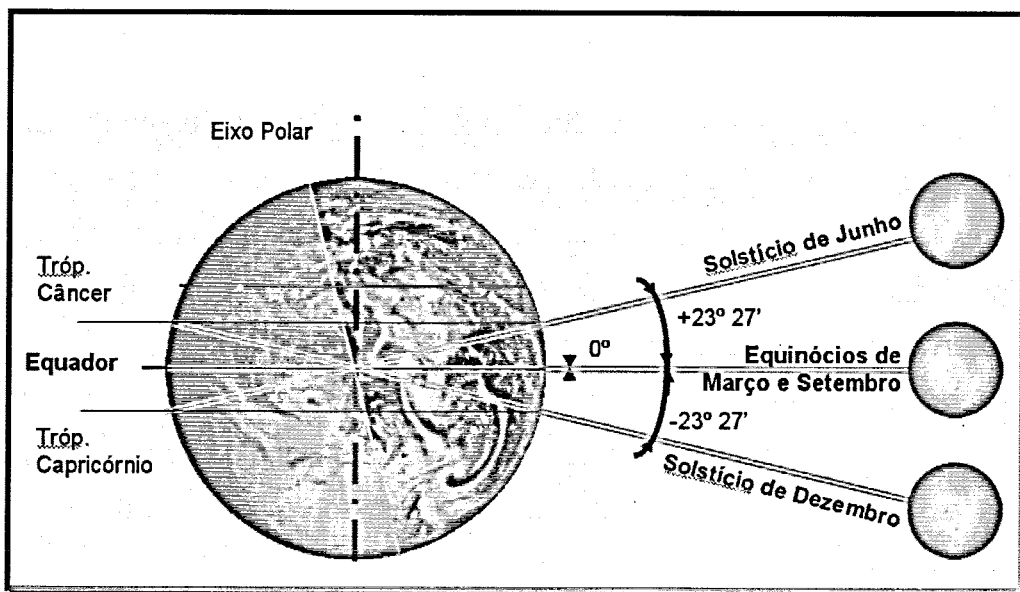
Devido a esta inclinação do eixo da Terra em relação à normal do plano da elíptica, o ângulo formado pelo plano do equador com a recta que passa pelo centro do sol e da terra está continuamente em mudança. Este ângulo é denominado por **declinação solar,  $\delta$** , definido como positivo desde o plano do

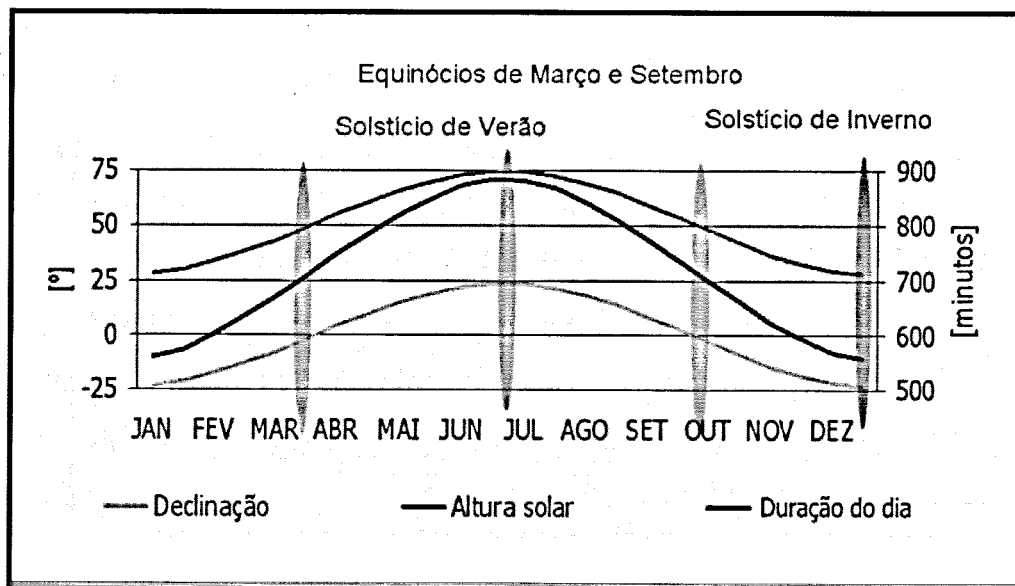
equador até à recta Sol - Terra. Consideraremos o valor de  $\delta$  constante durante um dia, já que em 24 horas a sua variação máxima é menor de  $0.5^\circ$ .

A declinação solar é  $\delta = 0^\circ$  nos **Equinócios**. No hemisfério norte é denominado **Equinócio de Primavera** (até 20/21 de Março) e de **Outono** (até 22/23 de Setembro). No hemisfério sul passa-se a situação inversa.

Devido ao Sol estar no equador, a duração dos dias é igual à das noites em toda a Terra (de facto, *equinócio* significa "noites iguais", subentendo-se "iguais aos dias"). A posição em que o sol nasce e se põe coincide respectivamente com Este e Oeste.

No **solstício de verão** (até 21/22 de Junho),  $\delta = 23.27^\circ$ , o Sol encontra-se sobre o Trópico de Câncer, sendo o dia mais longo e a noite mais curta no hemisfério norte, nascendo o Sol em Nordeste e pondo-se em Noroeste. No **solstício de Inverno** (até 21/22 de Dezembro),  $\delta = -23.27^\circ$ , o Sol encontra-se sobre o Trópico de Capricórnio, o que faz com que no hemisfério norte seja o dia mais curto e a noite mais longa, nascendo o sol em Sudeste e pondo-se em Sudoeste. Obviamente no hemisfério sul passa-se de forma inversa.





#### 2.4.1.1.2.3 Posição do sol em relação a superfícies

##### Terrestres horizontais

A posição do Sol em relação a um ponto sobre a Terra determina a quantidade de radiância solar que incide sobre esse ponto. Esta posição do Sol depende da localização geográfica do ponto, da hora e do dia.

Para expressar esta posição do sol em relação a um ponto da superfície terrestre, existem diversos sistemas de referência, sendo o mais usado, em energia solar o **sistema horizontal**. Este sistema baseia-se numa esfera imaginária, chamada **esfera ou abóbada celeste**, cujo centro é a posição do observador ou ponto de referência sobre a Terra. Cada um dos pontos da esfera celeste representa uma direcção do céu visto desde a Terra. O observador só contempla meia abóbada, porque o plano do horizonte impede-o de ver a parte que este oculta. Em linha recta sobre a cabeça do observador

define-se um ponto da abóbada chamado **zênite**, e abaixo dos pés do mesmo e no pólo oposto o zênite encontra-se o **nadir**.

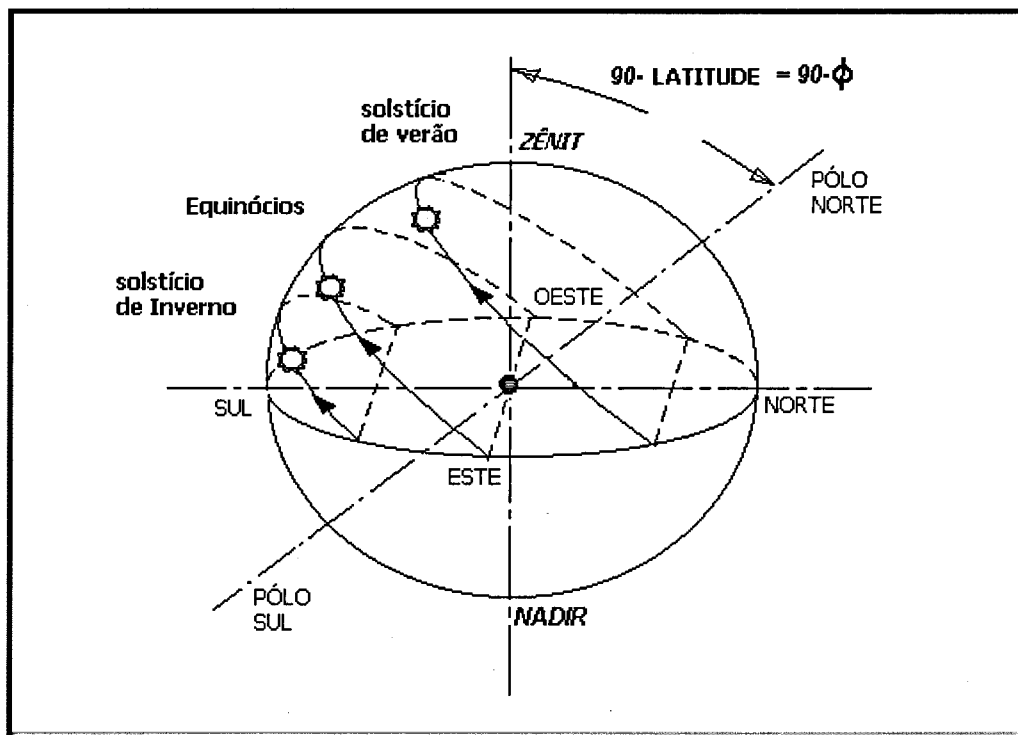
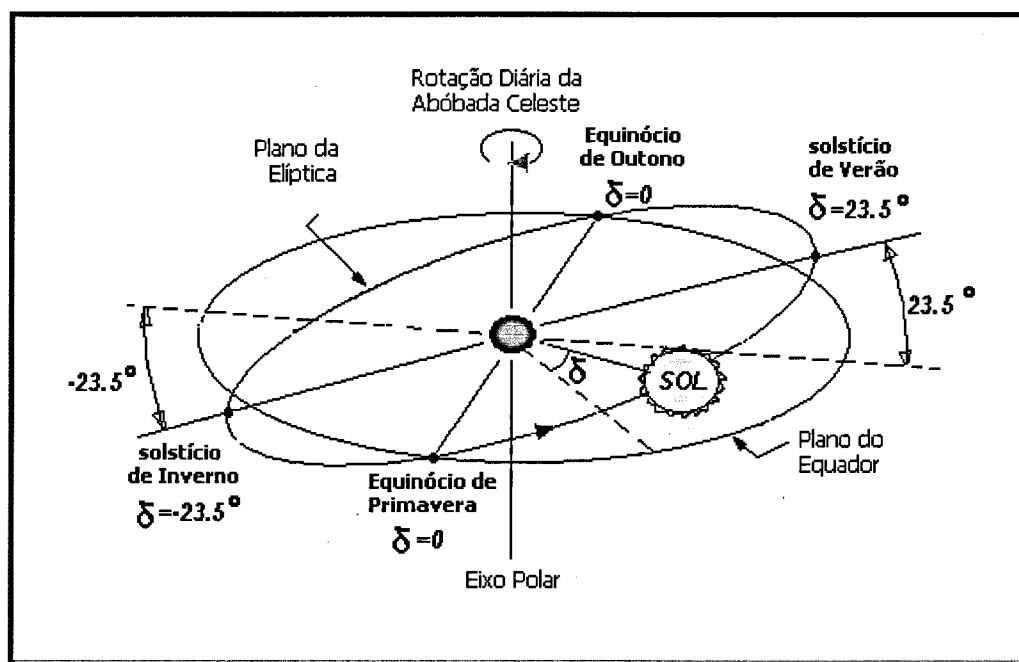


Figura 14 – Sistema Horizontal.

Como se pode ver na figura 4, o horizonte corta equatorialmente a abóbada, e portanto é perpendicular ao eixo que vai de zênite até nadir. Segundo este sistema de referência, a Terra está fixa, girando Sol sobre esta. Esta rotação da abóbada faz-se sobre um eixo, chamado **eixo polar**, que é o prolongamento do eixo da Terra, que corta a abóbada nos pólos celestes (pólo norte e pólo sul).

O movimento da Terra ao redor do Sol pode considerar-se, segundo a representação deste sistema como um movimento do Sol ao redor da Terra seguindo o maior círculo que forma um ângulo de  $23.5^\circ$  com o equador celeste, e que se denomina **elíptica**. O Sol recorre a este círculo uma vez ao ano e a

abóbada celeste gira uma vez ao dia ao redor da Terra. Desta maneira, o Sol descreve diariamente ao redor da Terra um círculo cujo diâmetro muda de dia para dia e é máximo nos equinócios e mínimo nos solstícios. O sentido de rotação do Sol sobre a elíptica e da abóbada celeste ao redor da Terra são contrários.



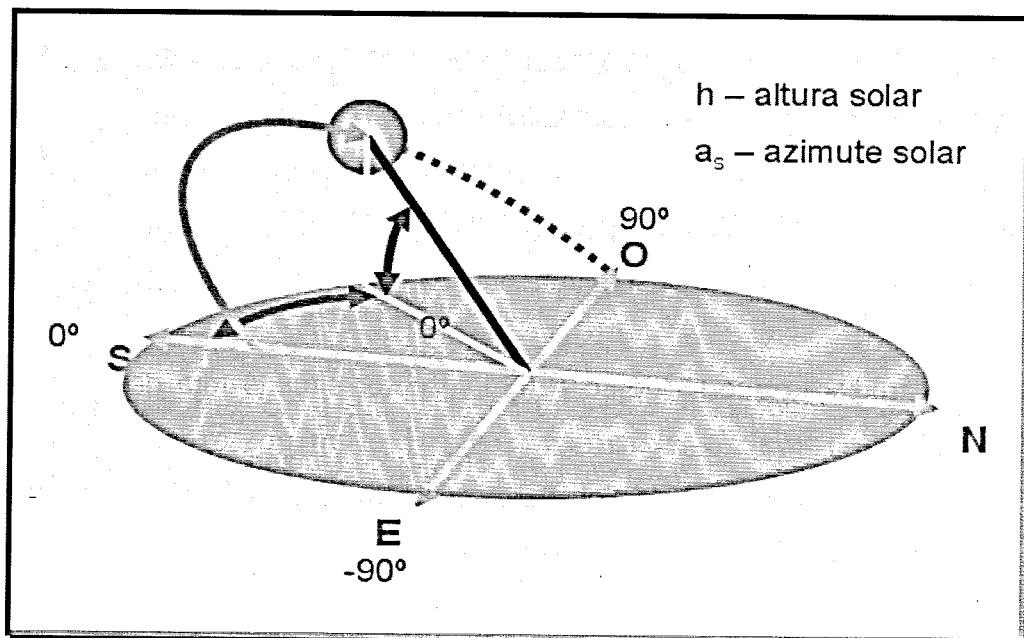
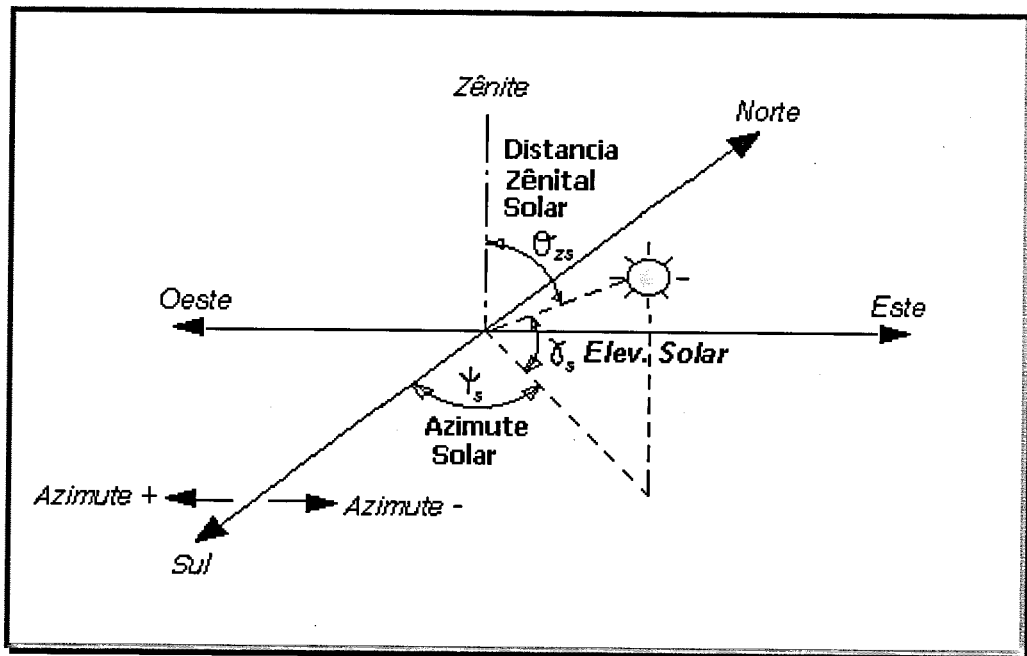
A **latitude** do lugar,  $f$ , pode definir-se como o ângulo complementar do ângulo formado pela recta que une zênite com nadir com o eixo polar.

Para localizar um ponto da abóbada celeste, em particular o Sol, em relação a uma superfície horizontal da Terra, utilizam-se habitualmente dois ângulos:

- o A **distancia Zênital**,  $qz$ : ângulo formado por vector ponto – Terra com a vertical do lugar. O seu complementar é a **elevação**,  $g$ . O lugar geométrico formado com os pontos com  $g = 0$  é o horizonte.



- O **azimute**,  $\gamma$ : ângulo formado pelos meridianos do ponto e do lugar. É positivo até o oeste e negativo até este. O azimute solar é o ângulo formado entre o sul e a projecção do Sol sobre o horizonte.

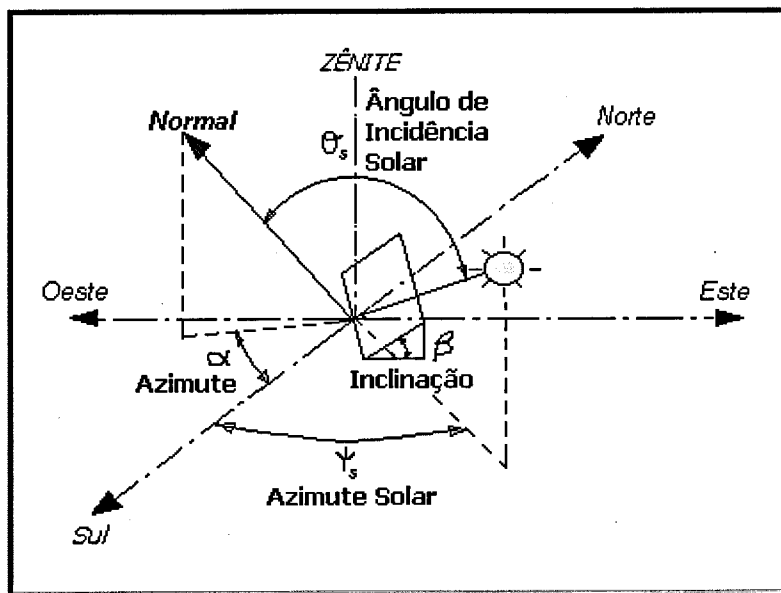


## Inclinadas

Na maioria das aplicações solares a superfície colectora de radiação solar não é uma superfície horizontal, porque se encontra inclinada.

A orientação de uma superfície inclinada descreve-se mediante dois ângulos:

- *Inclinação ou pendente,  $\beta$* , ângulo formado pela superfície e o plano horizontal.
- *Azimute,  $\alpha$* , ângulo formado pelas projecções sobre o plano horizontal da normal à superfície e do meridiano do lugar (d direcção sul). Valor constante.



A radiação que incide sobre um receptor situado fora da atmosfera, é denominada **radiação extraterrestre**, e provem quase exclusivamente da emitida em linha recta pelo Sol. Parte desta radiação não chega à superfície terrestre, devido às seguintes causas:

Os fotões com longitudes de onda dentro do espectro visível e infravermelho têm interacção com moléculas gasosas e pó de forma a que se difundem em todas as direcções, de modo a que parte da radiação é reflectida de novo para o espaço, sobre tudo para baixas longitudes de onda, dando a cor azul ao céu. No caso de nuvens densas a dispersão pode fazer com que até 80% dos fotões incidentes regressem ao espaço.

Parte da radiação do espectro infravermelho é absorvida pelo vapor de água, dióxido de carbono e outros elementos atmosféricos.

Todos estes fenómenos provocam que seja reduzida a radiação na superfície da terra para pouco mais de metade da intensidade na alta atmosfera. Podemos então diferenciar três componentes de radiação solar incidente sobre um receptor ao nível do solo:

- **Radiação directa**, que corresponde à radiação que viaja directamente do Sol em linha recta;
- **Radiação difusa**, que corresponde à radiação devida aos raios não directos, e reflectidos pela atmosfera em direcção ao receptor. Devida aos raios não directos e dispersos pela atmosfera na direcção do receptor. Depende fundamentalmente das nuvens, e portanto é fortemente variável no tempo;
- **Radiação reflectida ou do albedo**, proveniente da reflexão do solo (albedo) e dos objectos circundantes. Depende das características do solo.

A **radiação global** é a radiação total que incide numa superfície que corresponde à soma das três componentes.

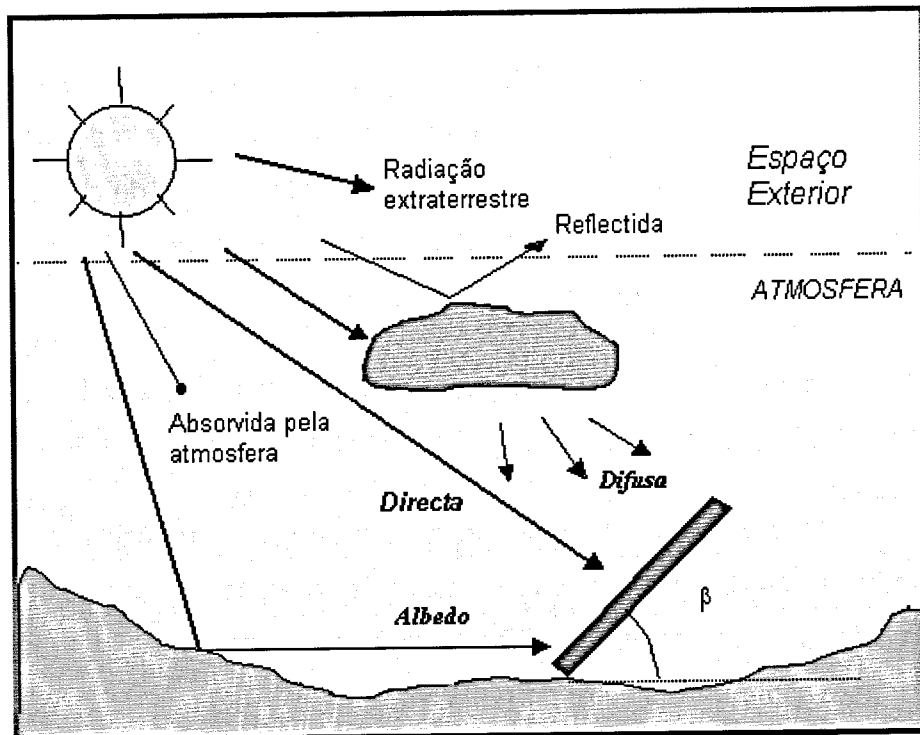


Figura 15 – Radiação solar Total.

A produção de electricidade, através de um sistema fotovoltaico, é especialmente interessante em pontos de consumo isolados, onde não há acesso a rede eléctrica e onde é mais económico instalar um sistema fotovoltaico do que construir uma linha desde a rede até ao ponto de consumo.

A quantidade de energia que é necessário acumular calcula-se em função das condições climáticas da zona e do consumo de electricidade. Assim numa zona onde há muitos dias de sol por ano será necessário acumular pouca energia, e vice-versa.

É necessário calcular correctamente as necessidades, para otimizar o sistema e não sobredimensionar a instalação. O primeiro passo no projecto de uma instalação para a electrificação de um sistema isolado é estimar o consumo diário médio da instalação, devendo para isso ter em conta a potência

consumida e o tempo de funcionamento de cada aparelho ou lâmpada. Esse consumo deve ser incrementado para compensar as perdas na instalação.

A conversão directa da energia solar em energia eléctrica envolve a transferência dos fotões da radiação incidente para os electrões da estrutura atómica desse material.

Nos materiais semicondutores, sob o efeito de uma radiação luminosa, a energia dos fotões incidentes é directamente transferida para o sistema electrónico do material, podendo excitar electrões da banda de valência para a banda de condução e dando origem à criação de pares electrão (absorção). Para obter uma corrente eléctrica é criada uma estrutura de separação dos portadores de carga fotogerados, por acção do campo eléctrico interno, antes de se recombinarem. Segue-se logo a extracção das cargas em corrente contínua para utilização. A este efeito dá-se o nome de efeito Fotovoltaico.

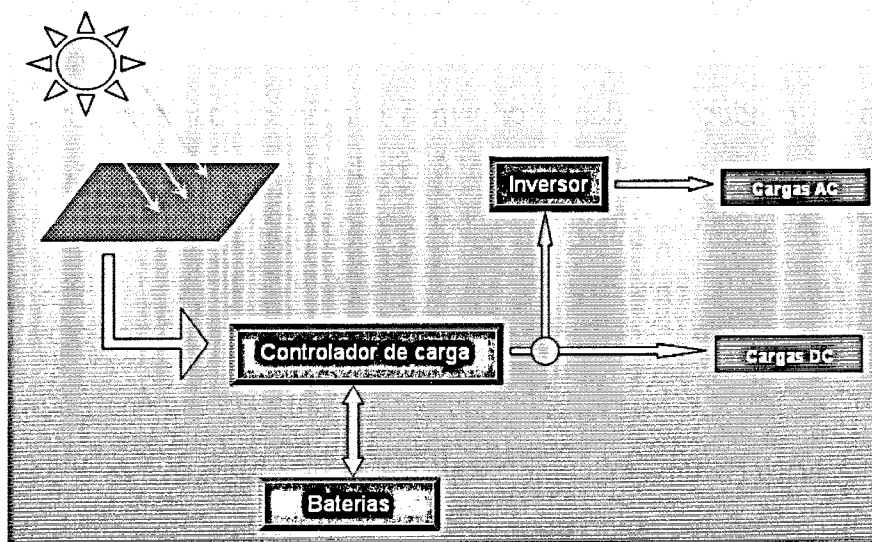
Em termos físicos a explicação é a seguinte:

A física de uma célula fotovoltaica é muito semelhante à clássica junção P-N de um díodo. Quando a luz é absorvida pela junção, a energia dos fotões absorvidos é transferida para um sistema de electrões do material, resultando na criação de portadores de carga que estão separados na junção. Os portadores de carga podem ser pares de electrões-iões num líquido electrolítico, ou pares completos de electrões num material semiconductor sólido.

Os portadores de carga na região da junção criam um gradiente potencial, são acelerados por um campo eléctrico e circulam como a corrente através de um circuito externo. A corrente ao quadrado vezes a resistência do circuito é a potência convertida em electricidade. A potência restante do fotão eleva a temperatura da célula. A origem do potencial fotovoltaico é a diferença entre o potencial químico, chamado nível de Fermi, dos electrões nos dois materiais isolados. Quando eles são unidos, a junção aproxima-se de um novo equilíbrio termodinâmico. Esse equilíbrio pode ser atingido apenas quando o

nível de Fermi for igual nos dois materiais. Isto ocorre pela passagem de electrões de um material para outro, até que uma diferença de tensão, entre os dois materiais, seja estabelecida e que tenha um potencial igual à diferença inicial do nível de Fermi. Este potencial produz a fotocorrente.

Os sistemas solares isolados baseiam-se no esquema apresentado:



Os componentes utilizados neste tipo de sistemas são:

#### 2.4.1.2 MÓDULO FOTOVOLTAICO

A componente principal de um sistema fotovoltaico é o módulo Fotovoltaico. Os fabricantes de módulos fotovoltaicos indicam as características destes em condições STC (*Standard Testing Conditions*) correspondem a  $1\text{kW/m}^2$  de radiação solar e uma temperatura do módulo de  $25^\circ\text{C}$ , o que corresponde a uma temperatura ambiente de aproximadamente  $-5^\circ\text{C}$ , dependendo do módulo. Os módulos fotovoltaicos operam normalmente a uma temperatura superior aos  $25^\circ\text{C}$ . A temperatura das células fotovoltaicas constituintes do módulo podem, no entanto, ser calculadas a partir de uma

outra característica indicada pelo fabricante, o NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*) o que permite corrigir as características que o módulo teria a STC para a temperatura ambiente através de coeficientes indicados pelos fabricantes que indicam a variação de características por grau centigrado (Por ex. BP SX 110 "Temperature coefficient of  $I_{sc} = (0.065 \pm 0.015) \%/^{\circ}C$ ").

O painel fotovoltaico consiste numa associação de células fotovoltaicas e converte a energia Solar em energia eléctrica.

Existem três tipos principais de células solares, com grandes variações de eficiência e custos:

As **células mono-cristalinas** representam a primeira geração. Aqui o rendimento eléctrico é relativamente elevado (aproximadamente 16%, podendo subir até cerca de 23% em laboratório), mas as técnicas utilizadas na sua produção são complexas e caras. Por outro lado, é necessária uma grande quantidade de energia no seu fabrico, devido à exigência de utilizar materiais em estado muito puro e com uma estrutura de cristal perfeita.

As **células poli-cristalinas** têm um custo de produção inferior por necessitarem de menos energia no seu fabrico, mas apresentam um rendimento eléctrico também inferior (entre 11% e 13%, obtendo-se até 18% em laboratório). Esta redução de rendimento é causada pela imperfeição do cristal, devido ao seu sistema de fabrico.

As **células de silício amorfo** são as que apresentam um custo mais reduzido, mas em contrapartida o seu rendimento eléctrico é também o mais reduzido (aproximadamente 8% a 10%, ou 13% em laboratório). As células de silício amorfo são películas muito finas o que permite serem utilizadas como material de construção, tirando ainda o proveito energético.

Os painéis actualmente mais comercializados são compostos por conjuntos de células de silício monocristalino ou policristalino, ligadas em paralelo ou em série, e com rendimentos que variam entre os 10 e 13%. A

potência destes depende do tipo de ligação feita entre as diversas células (em série ou paralelo). Esta potência pode variar desde poucos Watts até 200 Watts (valores de equipamento comercializado).

Os restantes componentes utilizados neste tipo de sistemas são os mesmos que são utilizados nos sistemas eólicos isolados onde desempenham idênticas funções: Baterias, Controlador de carga e Inversores.

Nem todos os sistemas fotovoltaicos isolados necessitam de todos estes componentes, por exemplo, sistemas onde não sejam alimentadas cargas AC não necessitarão de inversor.

Num dia parcialmente enevoadado, o módulo fotovoltaico pode produzir até 80% da sua potência total, e num dia extremamente enevoadado cerca de 30% da potência total.

O número de painéis a instalar é calculado tendo em conta:

- A necessidade energética nos meses mais desfavoráveis;
- As condições técnicas ideais de orientação e inclinação, dependendo do lugar de instalação.

## **2.5 SÉRIES DE RADIAÇÃO SOLAR**

A Terra no seu movimento anual em torno do Sol, descreve em trajectória elíptica um plano com uma inclinação aproximada de  $23,5^\circ$  em relação ao plano equatorial. Esta inclinação é responsável pela variação da elevação do Sol no horizonte em relação à mesma hora, ao longo dos dias, dando origem às estações do ano e dificultando os cálculos da posição do Sol para uma determinada data, como pode ser visto na Figura 13.

### **2.5.1 PROCEDIMENTOS**

Neste ponto é nosso objectivo a criação de séries, representativas de diversos anos de radiação solar, tendo como dados as medições efectuadas

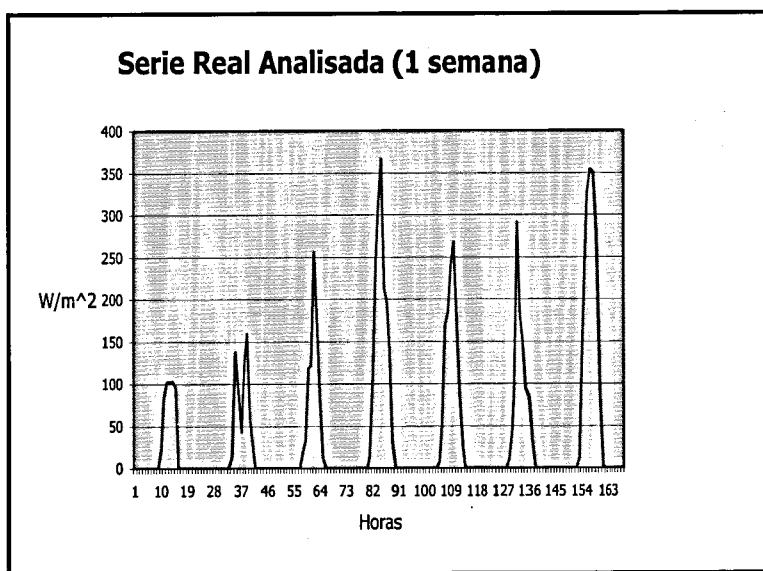


nesse mesmo local, ao longo de um ano, e dados geográficos do local em causa, descrevendo a seguir o procedimento adoptado.

Numa fase inicial de análise da série real, utilizada neste cálculo, deparamo-nos com problemas de datas inexistentes e de falta de medições para certas datas. Para resolver tal problema criamos um programa em Visual Basic (VB) que efectua a correcção da série, inserindo as datas em falta e copiando, no caso de valores em falta, os dados do dia anterior (ver código VB em anexoIII).

Devemos ter em consideração que a série fornecida tem medições para um ano, efectuadas de 10 em 10 minutos, pelo que foi necessário converter a série, com valores médios horários, para ser coerente com os restantes dados utilizados neste projecto, recorrendo para tal a funcionalidades do EXCEL e do VB.

Dispomos agora da série a ser analisada para "gerar" as restantes séries. Essa série está representada no gráfico em anexo II, mas do qual retiramos um excerto (Gráfico 8) referente a uma semana para que a interpretação dos procedimentos adoptados se torne mais fácil!

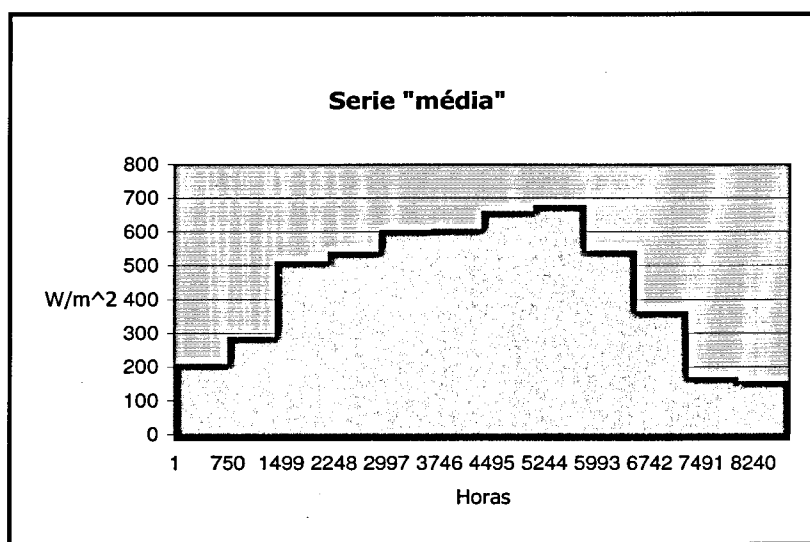


**Gráfico 8** – Valores para uma semana da Série Real.

Inicialmente, e tendo como base fundamentos teóricos, determinamos a série de irradiação solar extraterrestre e seguidamente tentamos compara-la com a série real, para posteriormente compararmos as duas para podermos utilizar esses resultados para gerar as séries. Infelizmente essa análise foi infrutífera e inconclusiva mas a forma da série de irradiação solar extraterrestre permite-nos, mais à frente, ajudar a validar as séries geradas (ver anexo V).

Tentamos também utilizar um método semelhante ao das séries eólicas mas devido à grande amplitude de valores e ao facto de a radiação solar à noite ser nula inviabilizou esse processo.

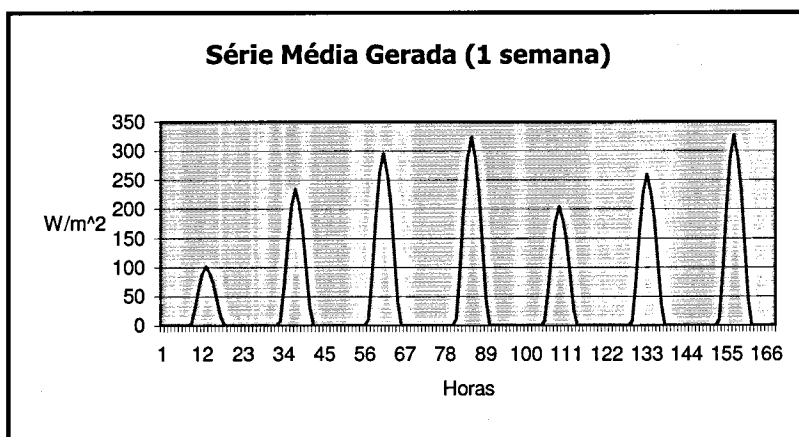
Partimos pois para uma abordagem diferente, tendo inicialmente efectuado uma filtragem dos dados, uma vez que apareciam valores diferentes de zero durante a noite, invalidando o processo. De seguida, calculamos os valores médios horários mensais para com eles criarmos uma série em que todos os dias de cada mês são representados por esses valores médios resultando na série que vemos no Gráfico 9.



**Gráfico 9** – Série com valores médios mensais.

Paralelamente, determinamos a média diária para todos os dias do ano, e utilizando os valores referentes a cada mês, efectuamos a análise de auto-

recursividade de 1ª ordem, utilizando o programa de análise SPSS, para determinar os valores de  $\theta_0$ ,  $\theta_1$  e  $e_t$  de cada mês. Com estes dados, o valor médio do primeiro dia de cada mês e a função de aleatoriedade do EXCEL relacionada com  $e_t$ , geramos valores médios diários, obtendo no final uma série com valores máximos diários gerados aleatoriamente, dependentes do dia anterior mas ainda com a forma "arredondada" da série média diária, não aparecendo portanto o efeito de "passagem de nuvens". O Gráfico 10 representa um período de uma semana para podermos visualizar os resultados actuais.

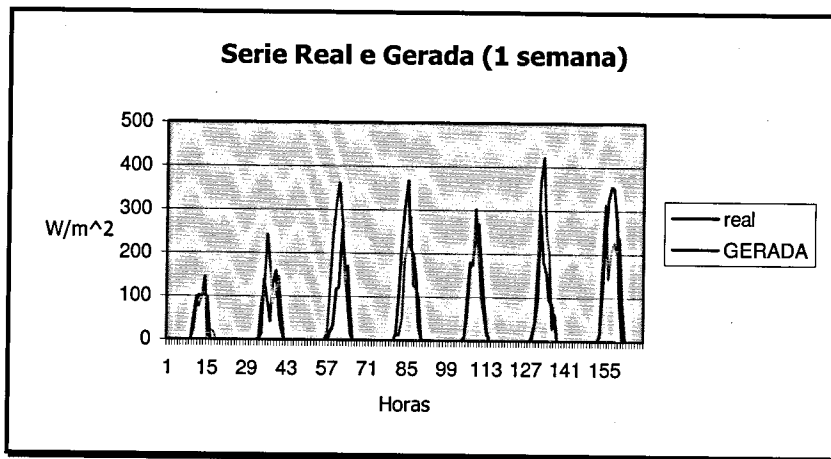


**Gráfico 10** – Série Média Gerada para 1 semana.

Voltando um pouco atrás, geramos a mesma série mas considerando os valores médios diários reais para a podermos comparar com os valores da série real, por divisão, para determinarmos uma série com um coeficiente de erro horário. Essa série é depois analisada para determinar a média e o desvio padrão horário para cada mês.

Finalmente, sobre a série média gerada, aplicamos, utilizando o EXCEL, um aleatório com a média e desvio-padrão do mês e da hora respectiva para obtermos a série gerada final. Essa série está parcialmente representada pelo

Gráfico 11 e totalmente representada e comparada com a série real no Gráfico 12.



**Gráfico 11** – Série Real e Série Gerada para uma semana.

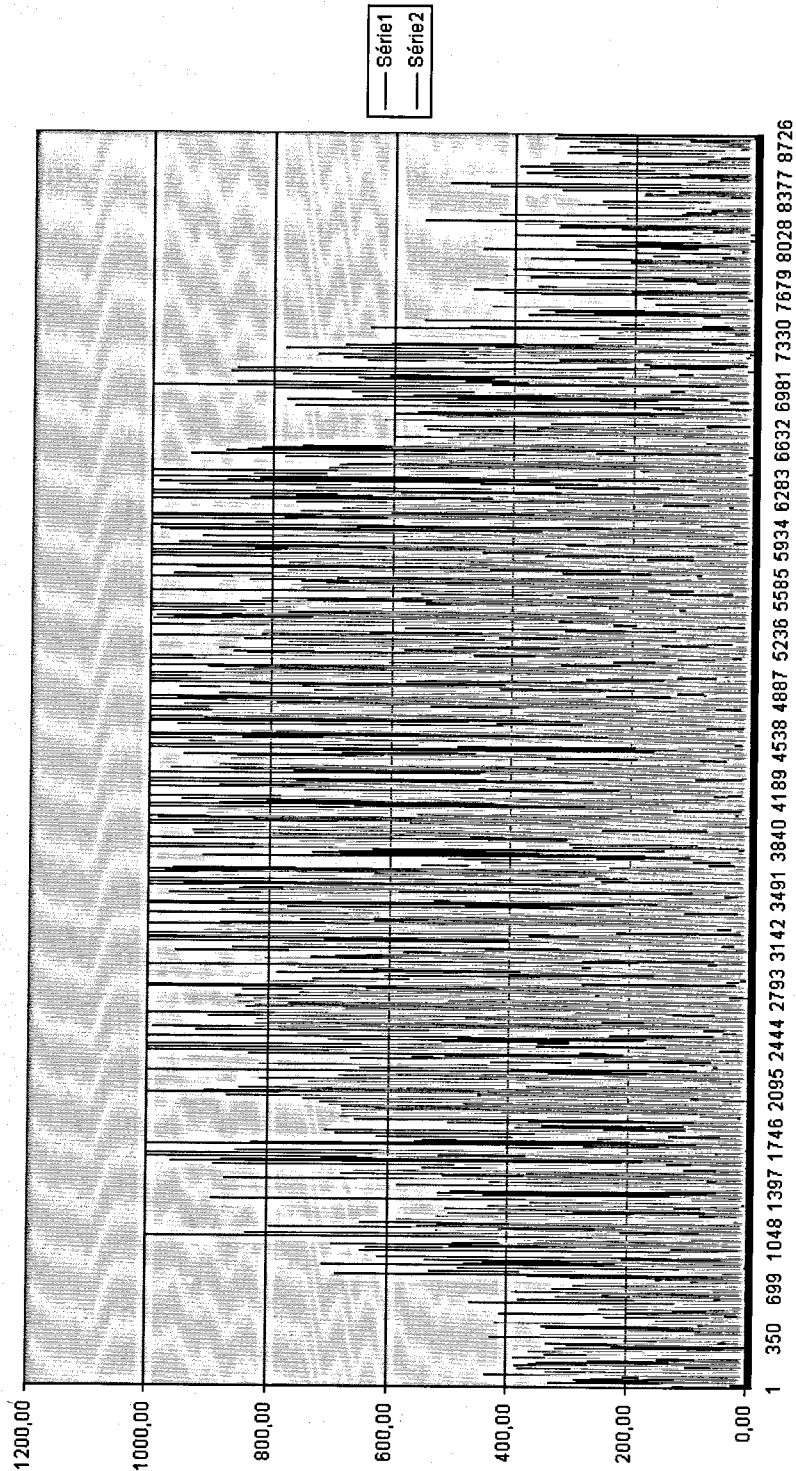
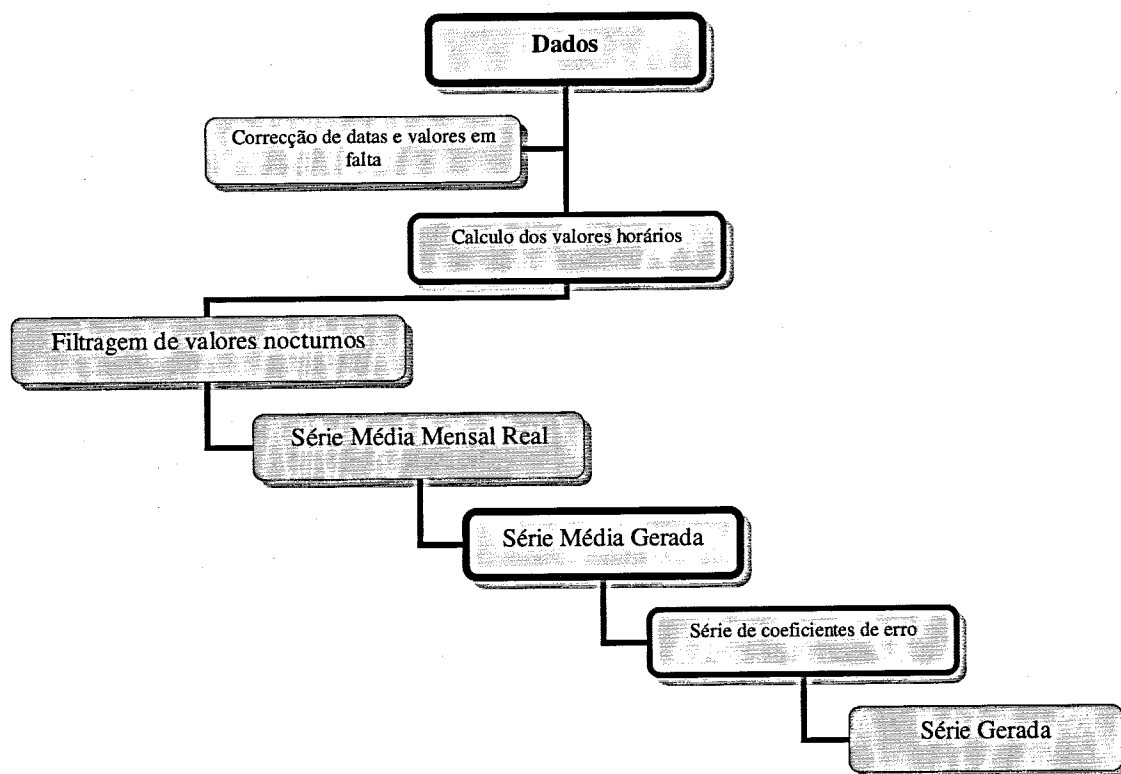


Gráfico 12 – Série Real e Série Gerada para um ano.

Podemos observar que a série gerada tem uma forma semelhante à real, e semelhante à forma da irradiação solar extraterrestre (ver anexo V).

Metodologia de cálculo:



## 2.6 SISTEMAS HÍBRIDOS ISOLADOS

O sistema híbrido tem como vantagem colmatar os defeitos de ambos os sistemas, permitindo-nos reduzir o investimento, visto não ser necessário sobredimensionar tanto cada um deles.

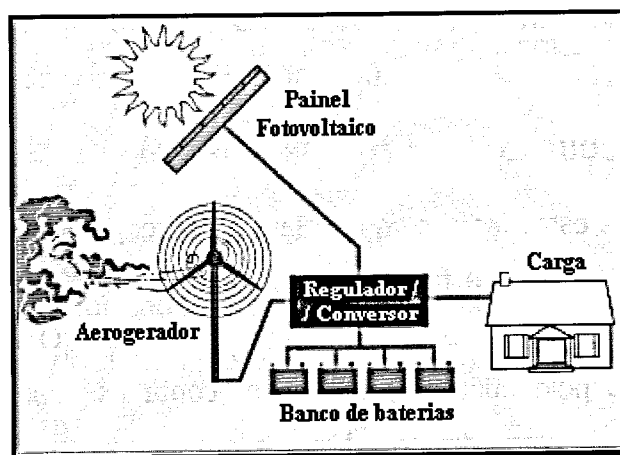


Figura 16 – Sistema Híbridos Isolados.

Os sistemas híbridos são aqueles que apresentam mais do que uma fonte de energia como, por exemplo, turbinas eólicas, módulos fotovoltaicos, entre outras. A utilização de várias formas de geração de energia eléctrica aumenta a complexidade do sistema e exige a optimização do uso de cada uma das fontes. Nesses casos, é necessário realizar um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência e optimização dos fluxos energéticos na entrega da energia para o usuário.

A forma de optimização do sistema torna-se um estudo particular a cada caso.

### 3 ÍNDICES DE FIABILIDADE E BEM ESTAR

Como já foi referido os índices foram criados no decorrer do projecto "Design of Demand Analysis Module" e compete-nos a nós testá-los e verificar a sua validade.

Faremos uma breve introdução aos princípios dos índices em causa podendo ser consultado o projecto anteriormente referido para aprofundar o estudo dos mesmos.

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Todos estes índices se baseiam no critério de bem-estar do sistema (*HC – Health Criteria*) que foi criado para analisar sistemas isolados de pequena dimensão (normalmente consumidores individuais). O valor deste critério pode ser definido pelo utilizador, tendo em conta as suas exigências em termos percentuais de carga disponível, por exemplo pode não se "incomodar" de não ter carga disponível entre as 2h e as 6h, pois encontrar-se-á a dormir, não significando isto que não irá ter carga mas sim que o critério de bem estar para esse período é 0%. Este critério foi criado para os sistemas de energias renováveis, tendo em consideração que o carácter intermitente destas energias não implica sempre uma total perda de carga.

##### 3.1.1 LOHP - LOSS OF HEALTH PERCENTAGE

Tal como o nome deste índice indica, trata-se da percentagem de tempo em que o sistema se encontra num estado de "NH" (*Not-Healthy*) e é calculado pela fórmula:

$$LOHP = \frac{\sum_{i=1}^{f(NH)} t(NH)_i}{n * 8760}$$



Sendo:

$$\sum_{i=1}^{f(NH)} t(NH)_i - \text{somatório dos tempos dos estados de "NH"};$$

$n$  - número de anos.

### 3.1.2 LOHE - LOSS OF HEATH EXPECTATION

Indica-nos o tempo total no estado de "NH", previsto para um ano, e calcula-se multiplicando o índice LOHP por 8760.

$$LOHE = LOHP * 8760$$

### 3.1.3 ASAI – AVERAGE SERVICE AVAILABILITY INDEX

Indica-nos a probabilidade de um sistema se considerar num estado de "H" (*Healthy*). É calculado subtraindo LOHP a 1.

$$ASAI = (1 - LOHP)$$

### 3.1.4 F(NH) – FREQUENCY OF NH STATE

Indica-nos o número de vezes que um sistema se encontra num estado de "NH" durante um ano. Não tem nenhuma forma específica de ser calculado e será um dos dados retirados da análise do sistema.

### 3.1.5 LOHMD - LOSS OF HEATH MEAN DURATION

Indica-nos a duração média dos estados de "NH" e pode ser calculado de duas formas:

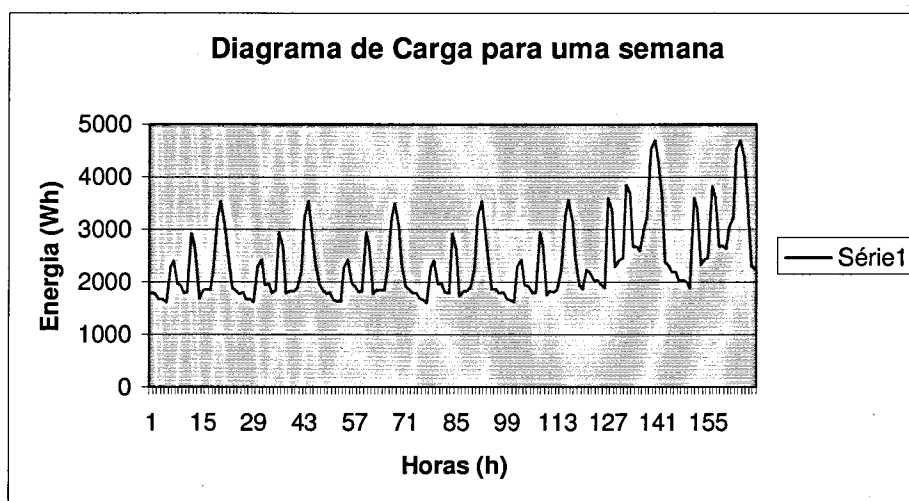
$$LOHMD = \frac{\sum_{i=1}^{f(NH)} t(NH)_i}{n * f(NH)} \Leftrightarrow LOHMD = \frac{LOHE}{f(NH)}$$

## 3.2 ANÁLISE DOS ÍNDICES

### 3.2.1 SISTEMA CONSIDERADO

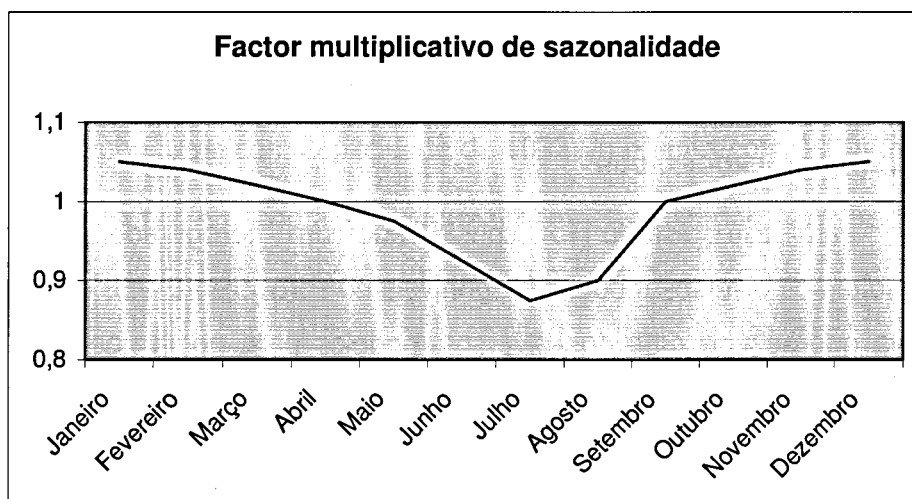
#### 3.2.1.1 CARGA:

A carga considerada tenta representar um consumidor tipo de um sistema isolado e pode ser representada para uma semana pelo Gráfico 13:



**Gráfico 13** – Diagrama de Carga para uma semana.

Essa carga será também afectada de uma sazonalidade mensal que visa representar as diferenças de consumos entre estações. Essa sazonalidade é introduzida multiplicando a série anual, com todas as semanas iguais à representada anteriormente, por um factor que depende do mês em causa. Esse factor está representado no Gráfico 14:



**Gráfico 14** – Factor Multiplicativo de Sazonalidade

### 3.2.1.2 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Para este estudo foi considerado um painel fotovoltaico da marca BP, modelo SX170 com as seguintes características:

Potência máxima (Pmax): 170 W

Tolerância de potência:  $\pm 10\%$

Tensão nominal: 24 V

Dimensões – 159,3cm x 79cm = 1,25847 m<sup>2</sup>

O cálculo da energia produzida pelo painel é efectuado da seguinte forma:

$$\text{Energia}(Wh) = \text{Radiação}(W / m^2) \times \text{rendimento} \times \text{área}(m^2) \times n^{\circ} \text{painéis}$$

Mas a este cálculo temos de impor uma condição de limite que é a potência máxima produzida pelo painel multiplicada pelo número de painéis:

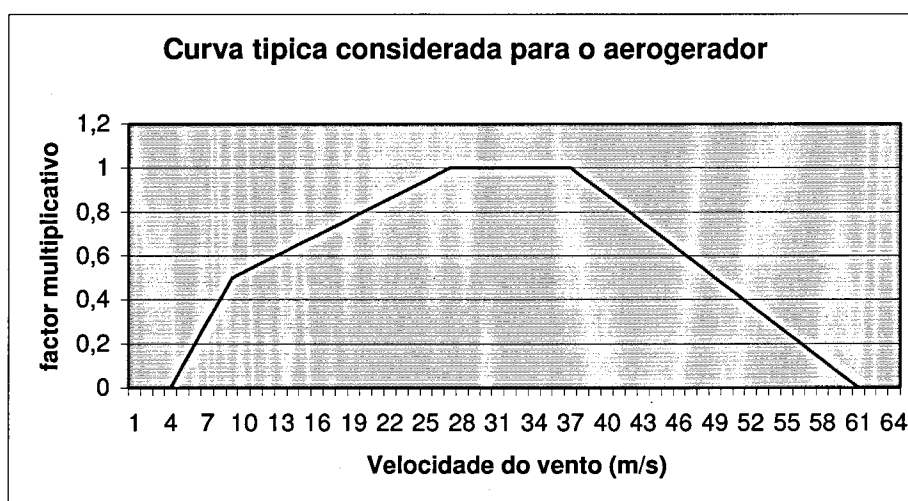
$$\text{Energia}(Wh) \leq P_{\max} \times 1h \times n^{\circ} \text{painéis}$$

A variação da energia produzida pelos painéis fotovoltaicos foi obtida considerando uma alteração no número de módulos instalados.

### 3.2.1.3 AEROGERADOR

Para este estudo foi considerado um aerogerador tipo. Para tal consultamos diversos modelos disponíveis no software REWEB e "criamos" uma curva que se aproxima dos diversos modelos para podermos depois variar a potência máxima, obtendo assim diversas configurações.

A curva do aerogerador considerada foi:



**Gráfico 15** – Curva Típica Considerada para o aerogerador

Esta curva foi construída com base nos valores de *cut-in*,  $\frac{1}{2}$  RWS, RWS, *cut-out* e *cut-off* que são característicos de cada aerogerador, mas foi deixada, na folha de cálculo, a possibilidade de alterar esses valores para o caso de se escolher utilizar outro tipo de aerogerador.

Para calcular a energia produzida pelo vento é necessário determinar qual é o factor multiplicativo para o vento nessa hora e multiplicá-lo pela potência máxima produzida pelo aerogerador.

### 3.2.1.4 BATERIAS

Para este estudo foram consideradas dois tipos de baterias, ambas de 12V e de chumbo, uma com capacidade de 1032Wh e outra com 4400Wh.

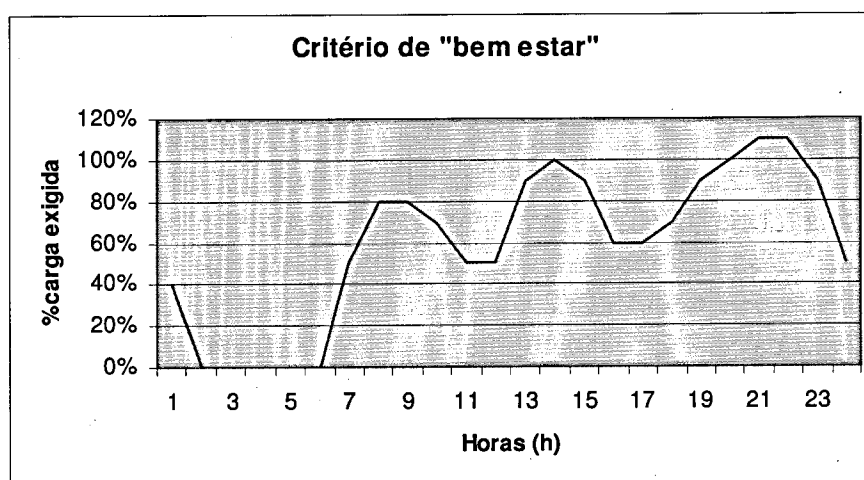
Devemos ter em conta que normalmente as baterias são usadas em grupos, para evitar utilizar baterias muito volumosas e por consequência muito dispendiosas.

Foram consideradas quatro hipóteses para as baterias:

- 10 x 1032Wh
- 20 x 1032Wh
- 10 x 4400Wh
- 20 x 4400Wh

### 3.2.1.5 REQUISITOS DE "H"

Para a análise dos índices de bem-estar, tal como referido anteriormente, necessitamos de estabelecer os critérios de "H". Estes critérios serão definidos caso a caso mas por agora apenas usamos o critério do Gráfico 16 e o critério unitário que corresponde a exigir a totalidade da carga.



**Gráfico 16 – Critério de "H"**

### 3.2.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO DOS ÍNDICES

No nosso estudo consideramos uma análise a séries de sete anos, com o intuito de obter maior precisão nos resultados dos índices. Este valor de sete anos deve-se a limitações do Excel que não nos permitia usar os 20 anos que inicialmente pretendíamos.

Partindo do princípio que as baterias se encontram na sua carga máxima no início deste estudo, retiramos-lhe a carga necessária, do diagrama de carga, e adicionamos-lhe a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos e pelo aerogerador, tudo para a mesma hora.

Paralelamente, compara-se a carga da bateria da hora anterior, adicionando a produção do aerogerador e do painel fotovoltaico, com o diagrama de carga multiplicado pela percentagem de carga exigida no critério de "H". Se o primeiro valor for inferior ao segundo, inserimos um valor "1" para essa hora, senão inserimos "0". No final somamos todos os valores dessa tabela e daí retiramos o valor do somatório dos tempos dos estados de "NH" em

horas,  $\sum_{i=1}^{f(NH)} t(NH)_i$ .

A seguir calculamos a frequência de "NH" efectuando uma análise à tabela anterior com a seguinte condição:

$$"=SE(N9=1;SE(N8=0;"início";0);0)"$$

sendo N9 o valor da hora actual na tabela anterior e N8 o valor da hora anterior na mesma tabela. Contando o número de vezes que "início" aparece e dividindo pelo número de anos considerados, obtivemos a frequência de "NH",  $f(NH)$ .

Para calcular os restantes índices limitamo-nos a aplicar as fórmulas já referidas na introdução deste capítulo.

### 3.2.3 RESULTADOS

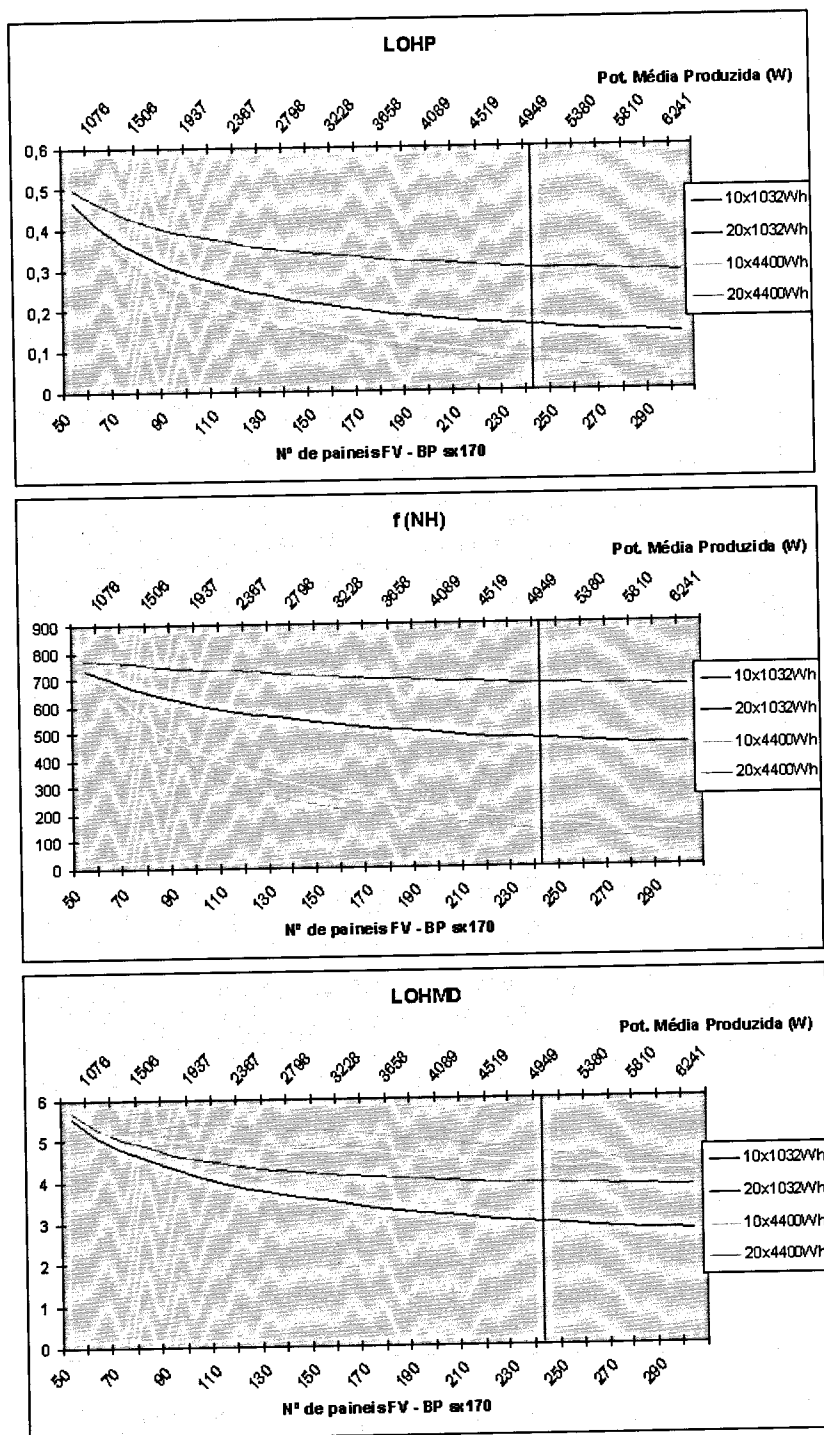
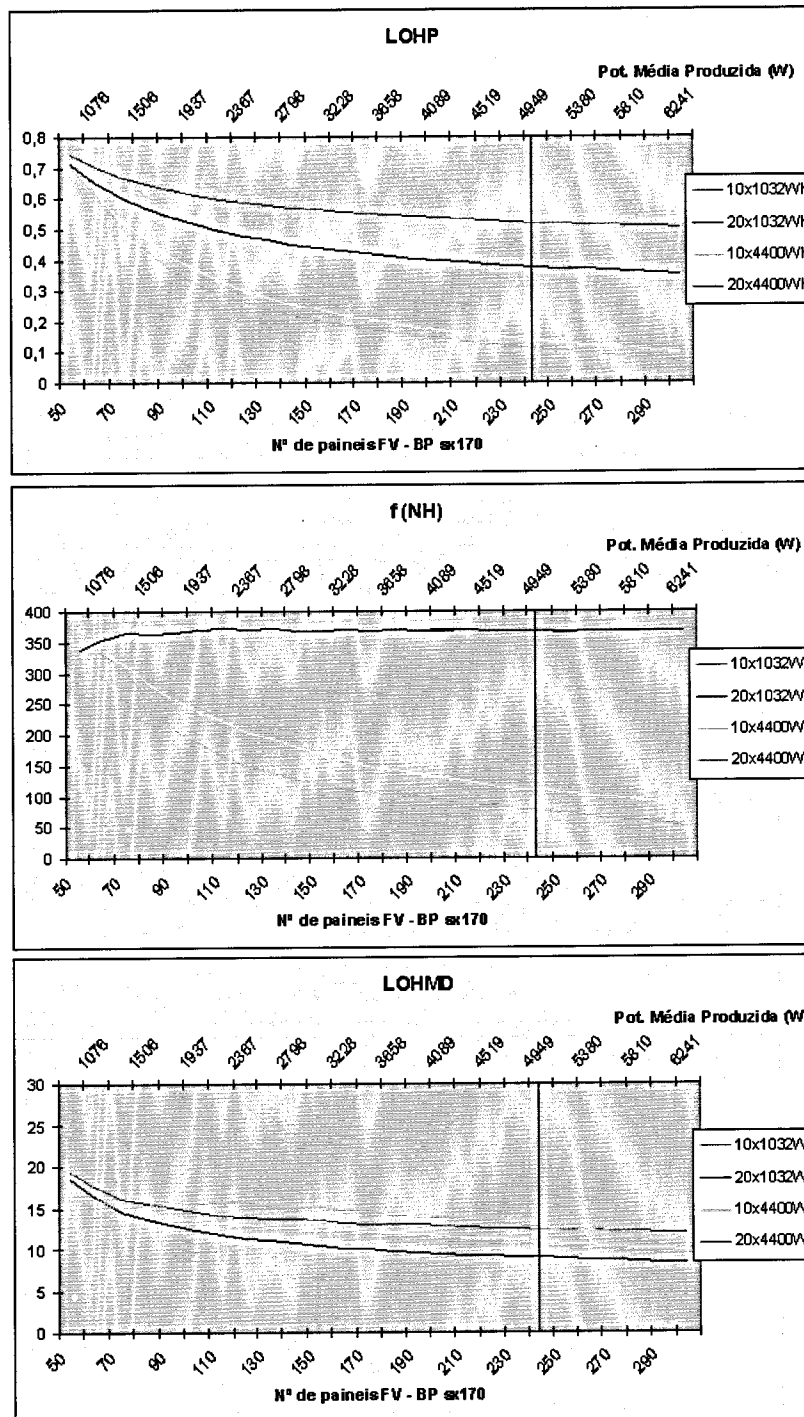


Gráfico 17 – Resultados para um sistema Fotovoltaico com o critério "HC" definido.



**Gráfico 18** – Resultados para um sistema Fotovoltaico com um critério "HC" a 100% da carga.



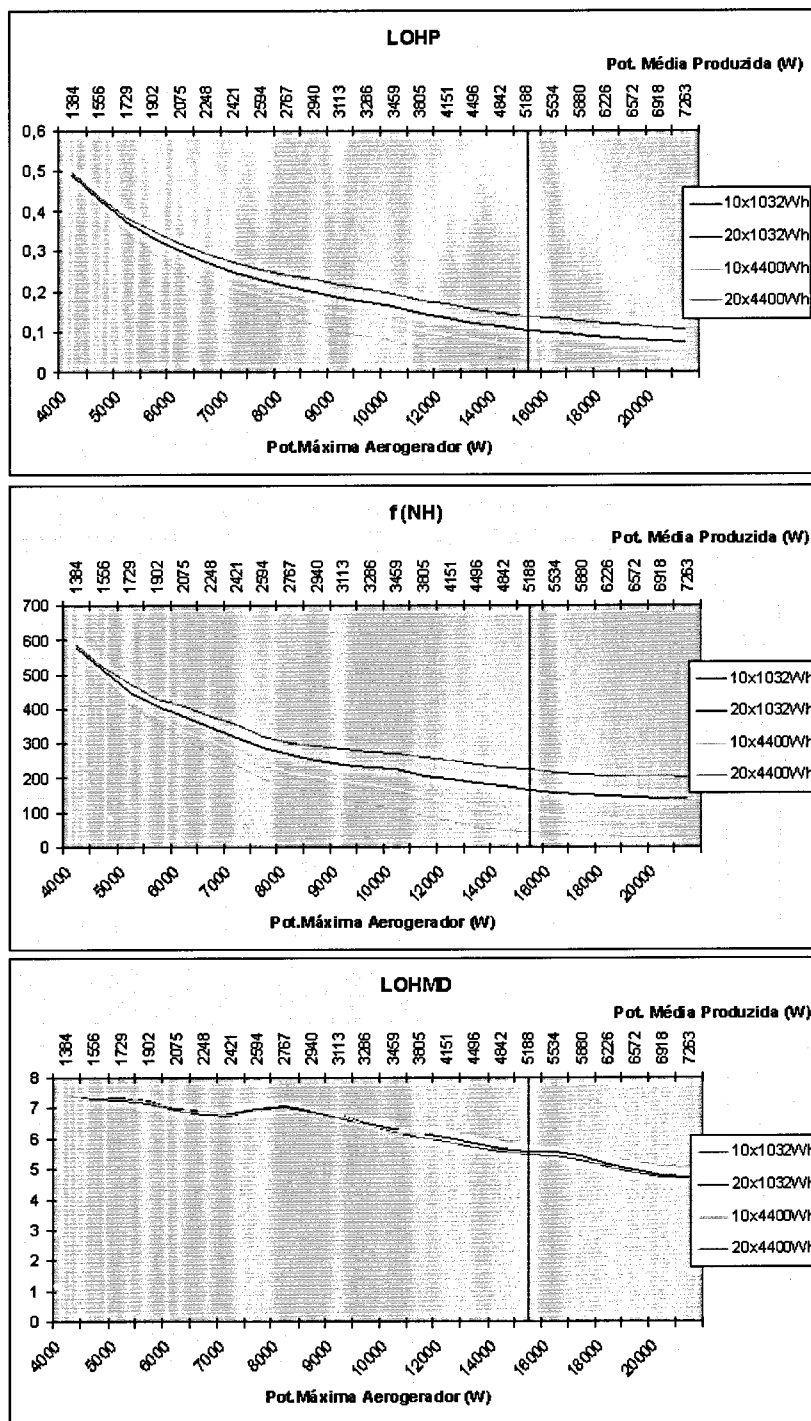


Gráfico 19 – Resultados para um sistema Eólico com o critério "HC" definido.

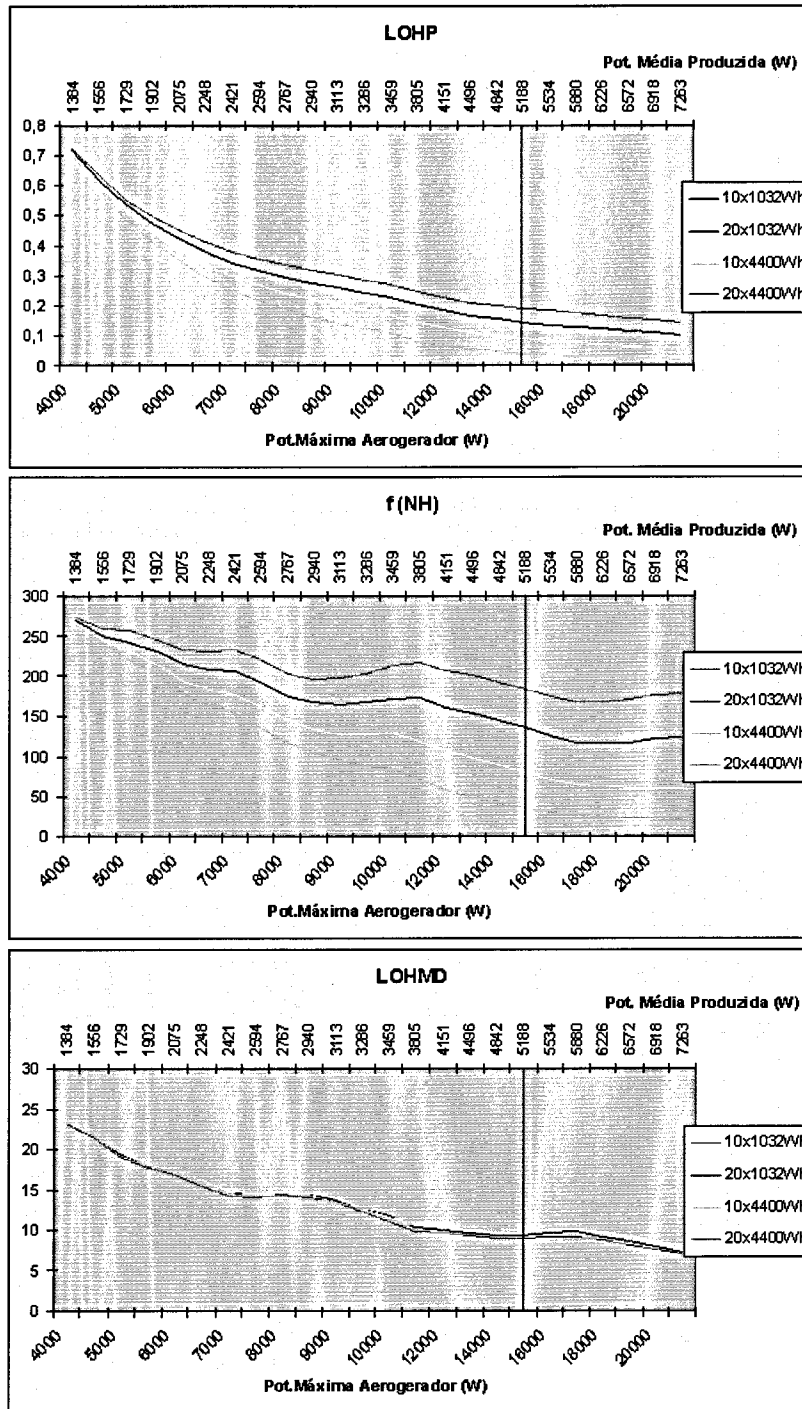
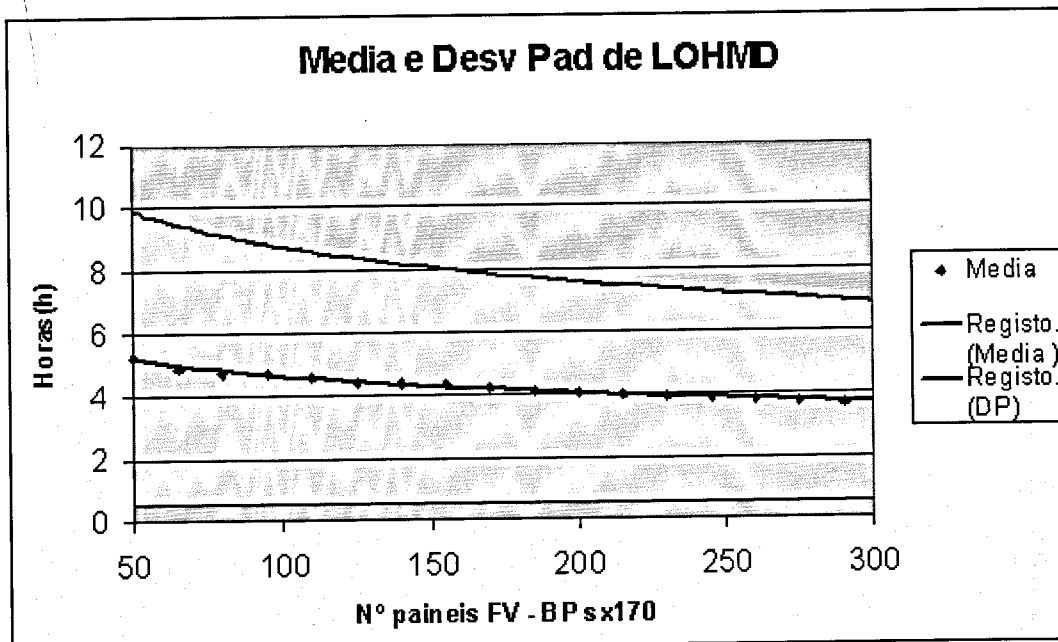
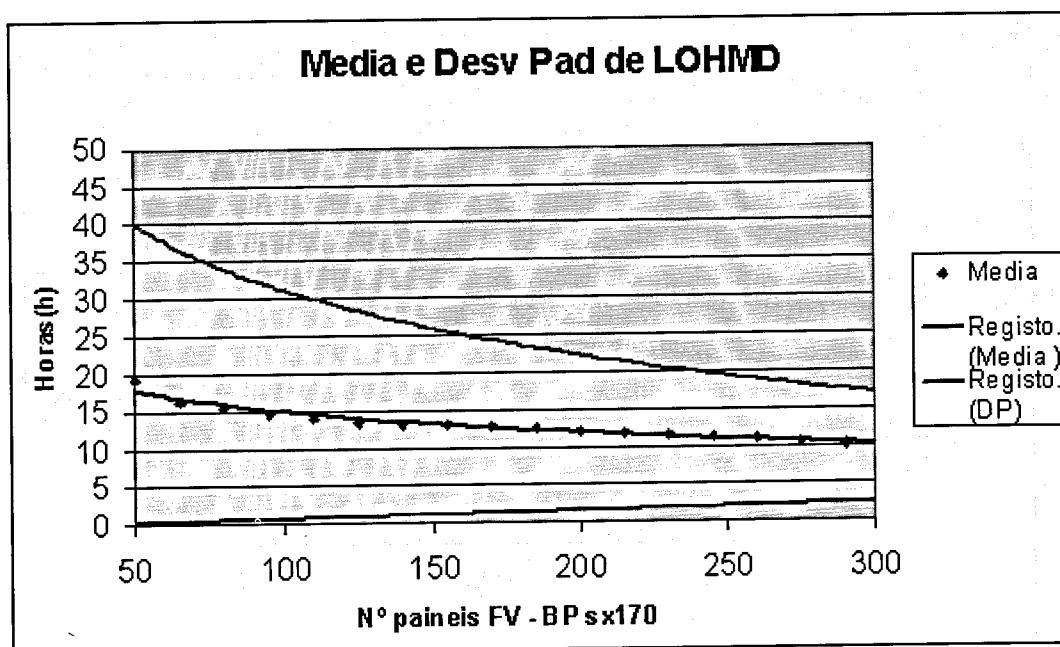


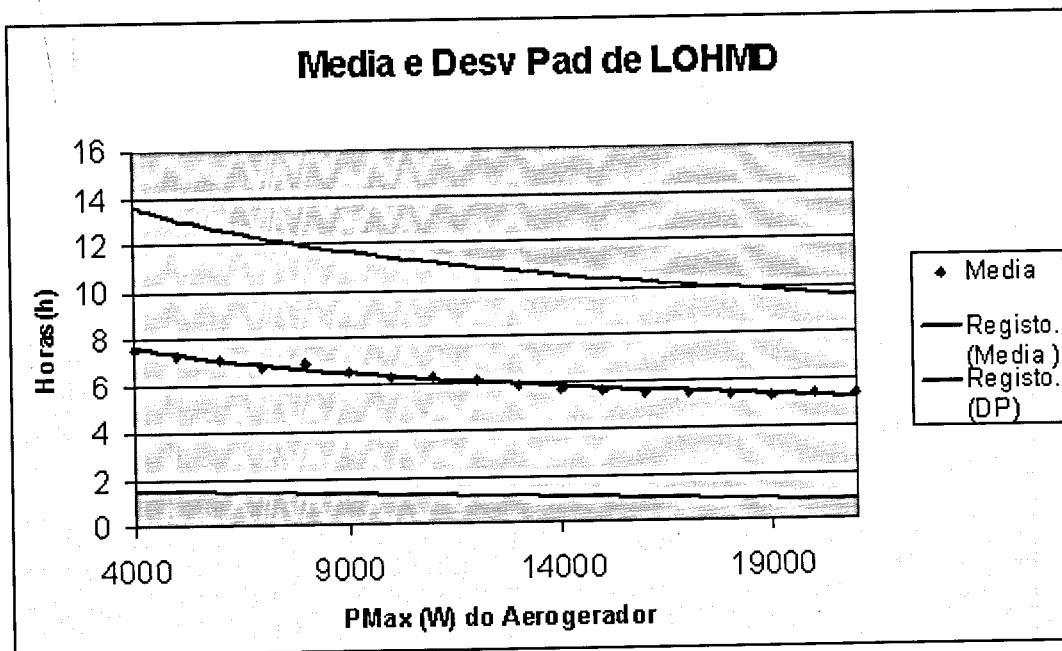
Gráfico 20 – Resultados para um sistema Eólico com um critério "HC" a 100% da carga.



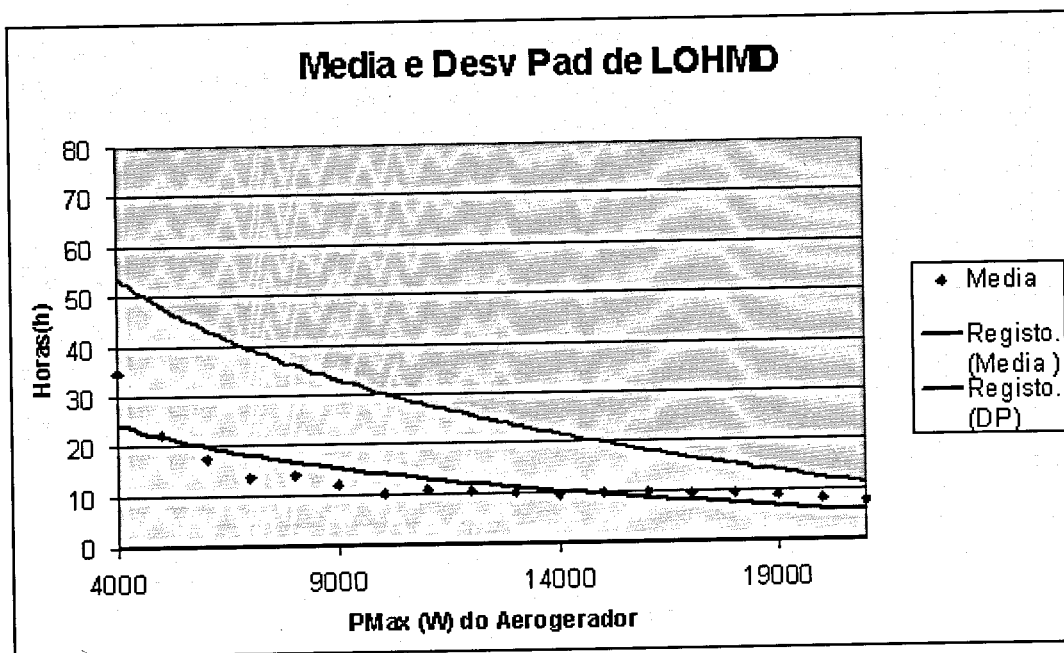
**Gráfico 21** – Média e desvio padrão para sistemas Fotovoltaicos, usando uma banco de baterias de 44000Wh, com o critério "HC" definido.



**Gráfico 22** – Média e desvio padrão para sistemas Fotovoltaicos, usando uma banco de baterias de 44000Wh, com um critério "HC" a 100% da carga.

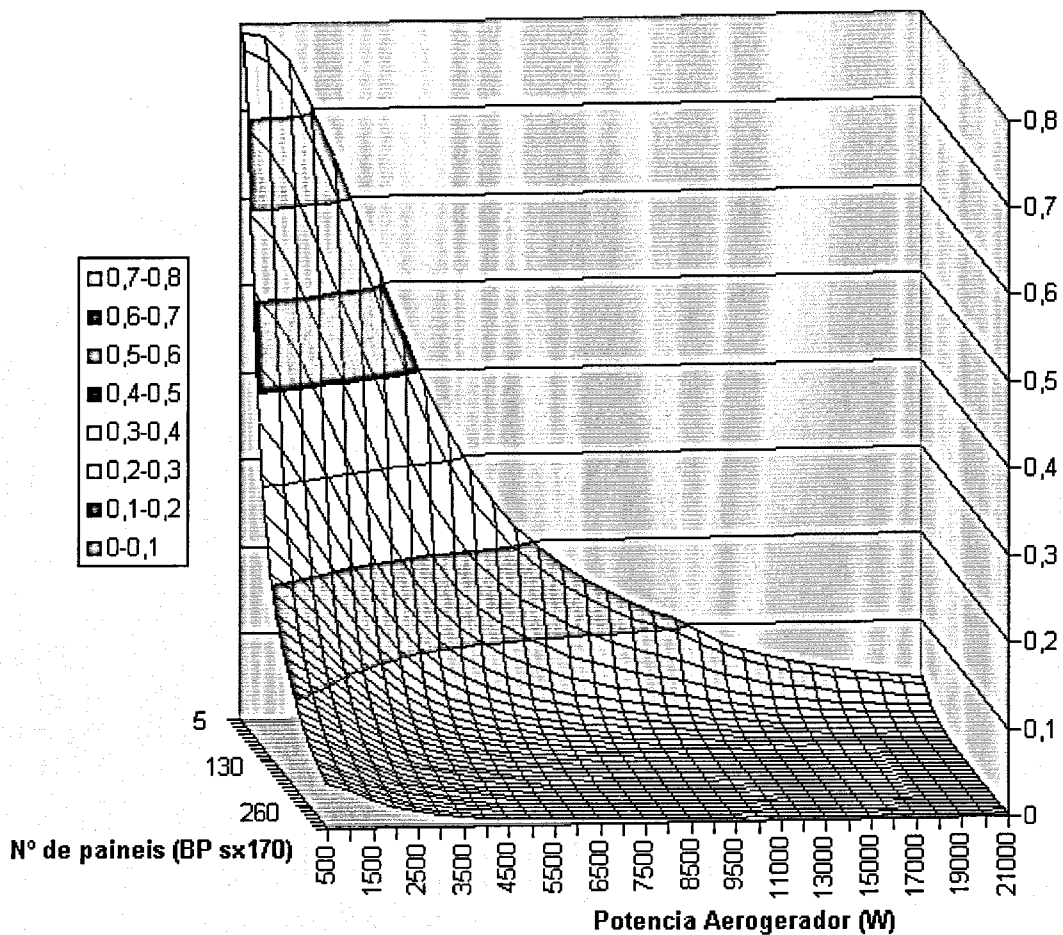


**Gráfico 23** – Média e desvio padrão para sistemas Eólicos, usando uma banco de baterias de 44000Wh, com o critério "HC" definido.

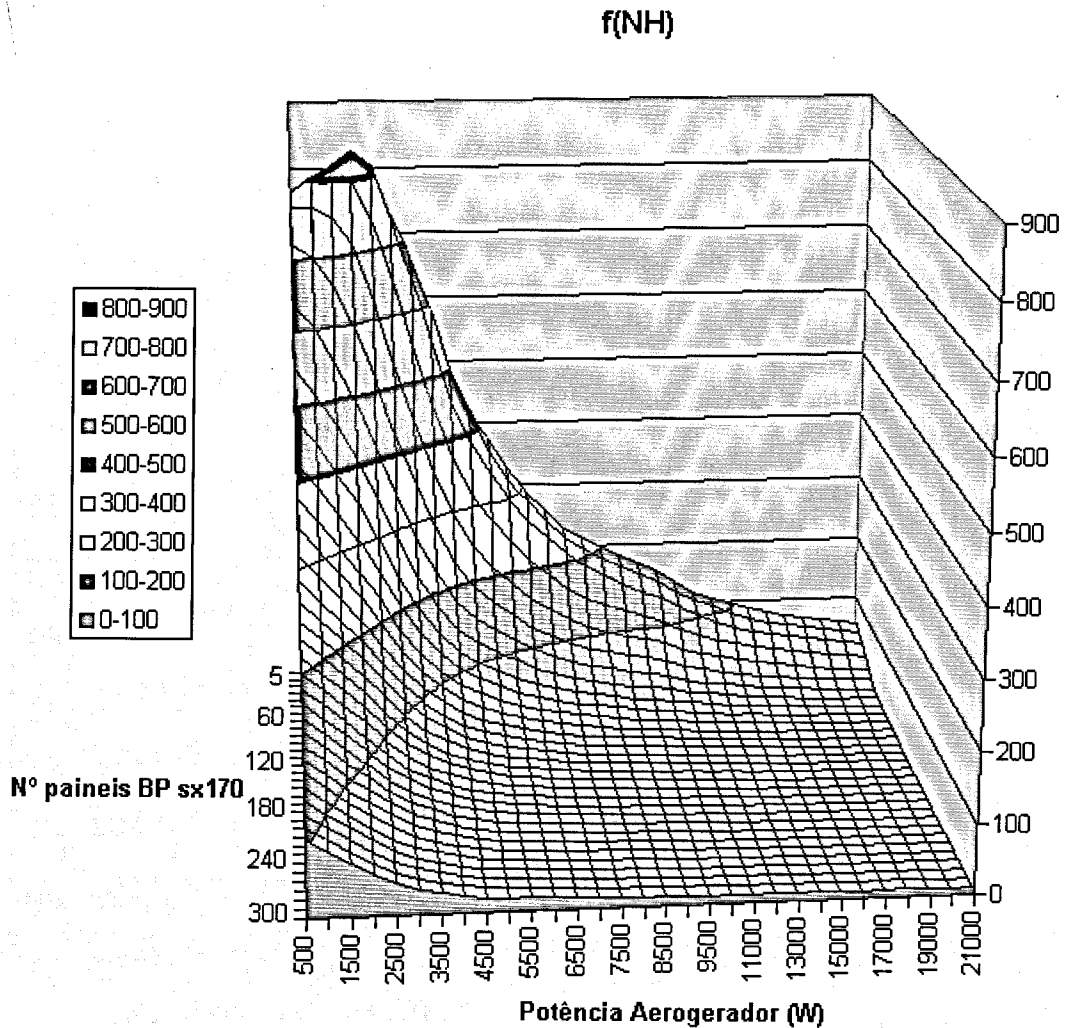


**Gráfico 24** – Média e desvio padrão para sistemas Eólicos, usando uma banco de baterias de 44000Wh, com um critério "HC" a 100% da carga.

### LOHP

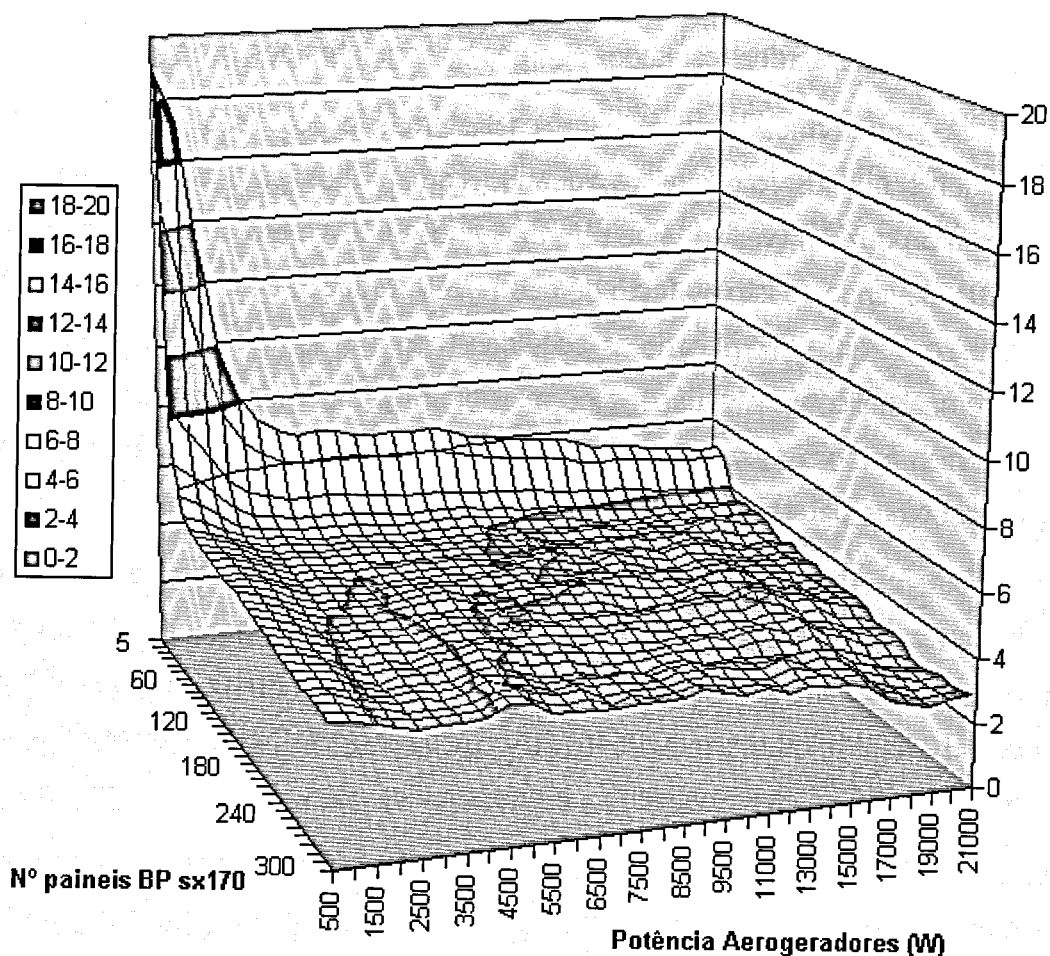


**Gráfico 25** – Gráfico 3-D do índice LOHP para um sistema híbrido, com um banco de baterias de 44000Wh.



**Gráfico 26** – Gráfico 3-D da frequência "NH" para um sistema híbrido, com um banco de baterias de 44000Wh.

### LOHMD



**Gráfico 27** – Gráfico 3-D do índice LOHMD para um sistema híbrido, com um banco de baterias de 44000Wh.

## 4 CONCLUSÕES

Por análise dos resultados fizemos as seguintes observações:

- em termos de fiabilidade os sistemas eólicos são substancialmente melhores que os fotovoltaicos, quando comparados para a mesma potência média produzida, (ver linha de referência nos 5000Wh em ambos os gráficos 18 e 20), devendo-se isto ao facto de não haver produção da parte do sistema foto voltaico durante diversas horas seguidas (período da noite!), ao contrário dos sistemas eólicos em situações normais. Será também por esta razão que os sistemas foto voltaicos são substancialmente mais dependentes da capacidade do banco de baterias instalado;

- a frequência de estados "NH" demonstrou ser extremamente importante para a selecção da capacidade do banco de baterias, se observarmos o gráfico 18 notamos que se optarmos por um banco de bateria com 10320Wh, ou mesmo 20640Wh, iremos ter uma  $f(\text{NH})$  superior a 600, para o caso de 300 painéis instalados, o que significa quase duas falhas por dia;

- o efeito da capacidade das baterias é mais relevante para sistemas de maior dimensão, ou seja, se quisermos alimentar uma carga maior não basta aumentar o banco de baterias proporcionalmente;

- por análise do índice LOHMD nos gráficos 18 e 20, podemos observar que apesar de os sistemas eólicos serem mais fiáveis que os foto voltaicos, a duração média esperada das falhas, é menor num sistema foto voltaico que num eólico, podendo ser este um dos critérios decisivos na escolha do sistema a implementar;

- também na análise do índice LOHMD, especialmente para os sistemas eólicos, observa-se que os valores não dependem muito da capacidade do banco de baterias instalado. Isso pode ser justificado pelo análise da frequência de "NH" e considerando que a presença das baterias irá eliminar primeiro as



falhas de menor duração, e por conseguinte, o número de estados "NH", elevando a duração média dos mesmos;

- denota-se uma presença de assíntotas nos gráficos dos índices LOHP e LOHMD, para os valores mais baixos, que indicam que especialmente nestes casos se deve ter uma atenção especial ao *trade-off* visto que um investimento bastante maior poderá não conduzir a uma melhoria significativa dos índices, e por conseguinte da fiabilidade do sistema;

- a análise dos gráficos do desvio padrão do índice LOHMD revela-nos que um sistema com um "HC" de 100% tem um desvio padrão percentualmente mais elevado que o caso com o "HC" definido nesta análise, implicando um maior grau de incerteza quanto à duração dos estados de "NH";

- os gráficos 3-D são especialmente úteis para o dimensionamento de sistemas híbridos, dando a hipótese de analisar as diversas hipóteses para os mesmos requisitos finais. Por exemplo, o LOHP será semelhante para um sistema com um aerogerador de 500W e 50 painéis foto voltaicos, e para um sistema com um aerogerador de 4000W e 5 painéis fotovoltaicos;

Chegamos à conclusão final que os índices aqui estudados são bastante flexíveis, quando comparados com os actualmente utilizados, podendo ser definidos caso a caso adequando-se aos requisitos de "bem estar" dos utilizadores de sistemas isolados. Se um cliente não se sentir lesado por não ter energia disponível durante a noite, pode defini-lo resultando isso numa poupança substancial em termos de custos monetários visto se poder dimensionar o sistema para valores inferiores de potência instalada, não significando que não irá ter energia durante a noite mas sim que poderá não a ter.

O índice LOHP, probabilidade de violação do requisito de bem estar, revelou-se uma medida eficiente da fiabilidade anual do sistema usando como referência uma definição detalhada do requisito de bem estar do cliente. Por

outro lado permite uma adequada modelização estocástica da intermitência características das fontes de energia renovável, eólica e solar.

O índice  $f(NH)$ , frequência de violação do requisito de bem estar, revelou-se muito interessante para o dimensionamento dos sistemas de armazenamento dos sistemas isolados (baterias, hidrogénio, etc. ).

Por fim o índice LOHMD, duração média das violações do requisito de bem estar, revelou-se muito eficiente para diferenciar a performance das diferentes fontes de energia, mostrando que apesar de um sistema eólico ter uma menor LOHP que o sistema FV este último tem interrupções com duração média mais curta, o que poderá ser uma informação de fiabilidade importante para a escolha do sistema.

## 5 BIBLIOGRAFIA

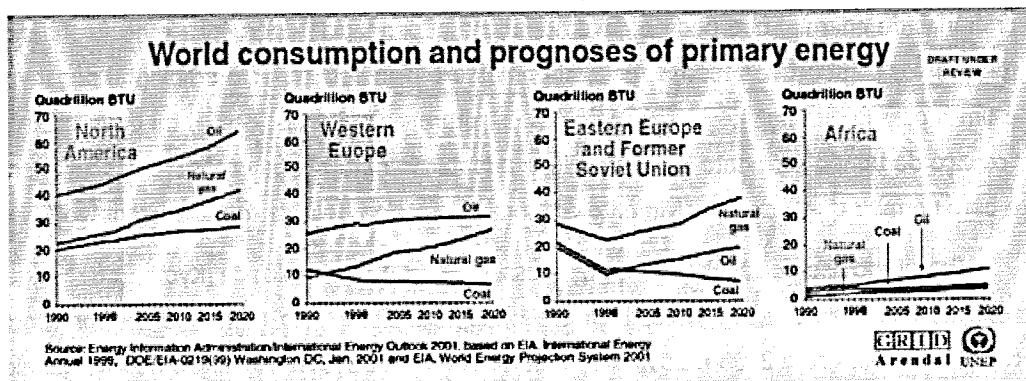
- <http://re.jrc.cec.eu.int> – visitada em Abril de 2006;
- <http://www.energiasrenovaveis.com> – visitada em Maio de 2006;
- <http://www.windatlas.dk/Europe/landmap.html> – Visitada em Junho de 2006;
- [www.grida.no](http://www.grida.no) – Visitada em Junho de 2006;
- <http://solar.fc.ul.pt/solar.htm> - Visitada em Junho 2006;
- [www.cerpch.unifei.edu.br/fontes\\_renovaveis/eolica.htm](http://www.cerpch.unifei.edu.br/fontes_renovaveis/eolica.htm) – Visitada em Maio de 2006;
- [www.windpower.org](http://www.windpower.org) – visitada em Março de 2006;
- [www.cresesb.cepel.br/abertura.htm](http://www.cresesb.cepel.br/abertura.htm) – Visitada em Maio de 2006;
- [www.eng-tips.com/](http://www.eng-tips.com/) - visitada em Abril de 2006;
- [www.engin.umich.edu/solarboat/bdtheory.html](http://www.engin.umich.edu/solarboat/bdtheory.html) - visitada em Junho de 2006;
- <http://analysis.nrel.gov/vipor/> – visitada em Maio de 2006;
- "Design of Demand Analysis Module", Cláudio Monteiro e António Oliveira, Porto, 2005;
- "Fórum Energias Renováveis em Portugal". ADENE/INETI, Lisboa 2001;
- M. Collares Pereira "Energias Renováveis, a Opção Inadiável". SPES, Lisboa 2000;
- *National Geographic* Portugal, edição de Julho 2002;
- V. de Brederode "Fundamentos de aerodinâmica incompressível", Edição do Autor, Lisboa 1997;
- "Wind Energy Conversion Devices", Von Karman Institute, 1990;
- Textos compilados por João Filipe Saraiva e Agostinho Miguel Garcia, ©ENERLINK 2002;
- "Manual de instalação de sistemas solares". AO SOL, Porto Alto 2001;

- "A energia eólica em Portugal – 2005", REN;
- "Wind and Solar Power Systems", Mukund R. Patel, New York, 1999;
- "Maintaining supply reliability of small isolated power systems using renewable energy", R. Billinton e R. Karki, Canadá, 2000;
- "Application of Monte Carlo Simulation to Generating System Well-Being Analysis Considering Renewable Sources", Armando M. Leite da Silva, Luiz Antônio F. Manso, Warley S. Sales, Leonidas C. Resende, Manuel J. Q. Aguiar, Manuel A. Matos, João A. Peças Lopes e Vladimiro Miranda, Iowa, 2004;

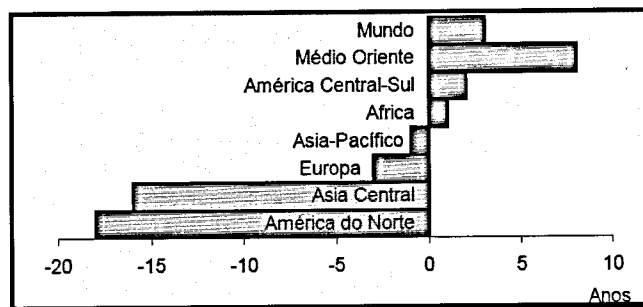
## 6 ANEXOS

### 6.1 ANEXO I – ENERGIAS RENOVÁVEIS – SITUAÇÃO ACTUAL

O petróleo tem claramente os "dias contados". As previsões, aos consumos actuais, são de que o petróleo convencional (crude) durará 40 ou 50 anos. Haverá algo mais, mas a custos e dificuldade de extracção mais elevados.



**Imagem 1** – Consumos e prognóstico de energias primárias mundiais. Esta relação é feita com dados reais entre os anos de 1990 e 2001 e depois desta data são previsões.<sup>2</sup>



**Imagem 2** – Previsão dos picos de produção de petróleo, por regiões, relativamente a 2003 [Duncan and Youngquist, 1998].<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Imagem retirada de <http://maps.grida.no>

<sup>3</sup> Fonte: <http://solar.fc.ul.pt/solar.htm>

A situação é grave uma vez que o pico de extracção deverá ser atingido na próxima década, o que provocará o aumento do seu custo para valores muito superiores ao de hoje.

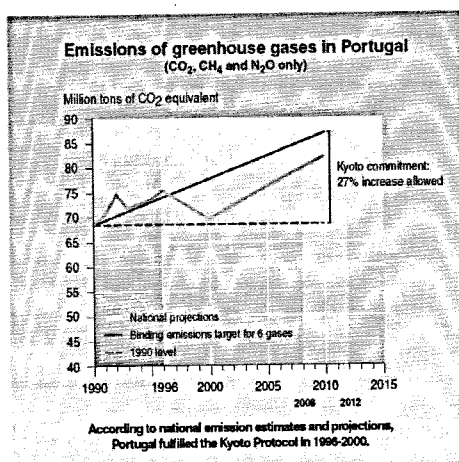
Assim:

*“O petróleo é um factor de pressão sobre os preços, e repercute-se a todos os níveis.”<sup>4</sup>*

Portugal é um país particularmente vulnerável a estes efeitos, visto ter uma dependência do petróleo de cerca de 64% e uma dependência energética exterior de cerca de 90%, sendo o país que tem mais dependência do petróleo a nível europeu.

Este problema leva obrigatoriamente a uma progressiva diversificação de fontes primárias de energia, que pode e deve atenuar a dependência energética e a dependência em relação aos combustíveis fósseis, pela sua finitude e pelo seu impacto ambiental negativo. Este é um processo que implica lentos reajustes estruturais e culturais, isto é, tal deve ocorrer num “espaço de tempo suficiente para permitir a adaptação natural dos ecossistemas às alterações, e para permitir que o desenvolvimento económico prossiga de uma forma sustentável”.

Este processo foi acelerado com a assinatura do Protocolo de Kyoto, que exige uma redução das emissões de gases, com efeito de estufa, de pelo menos cinco por cento, aos níveis de 1990, entre 2008 e 2012, impondo como meta 39% de produção de energia eléctrica com base nas energias renováveis até 2010.



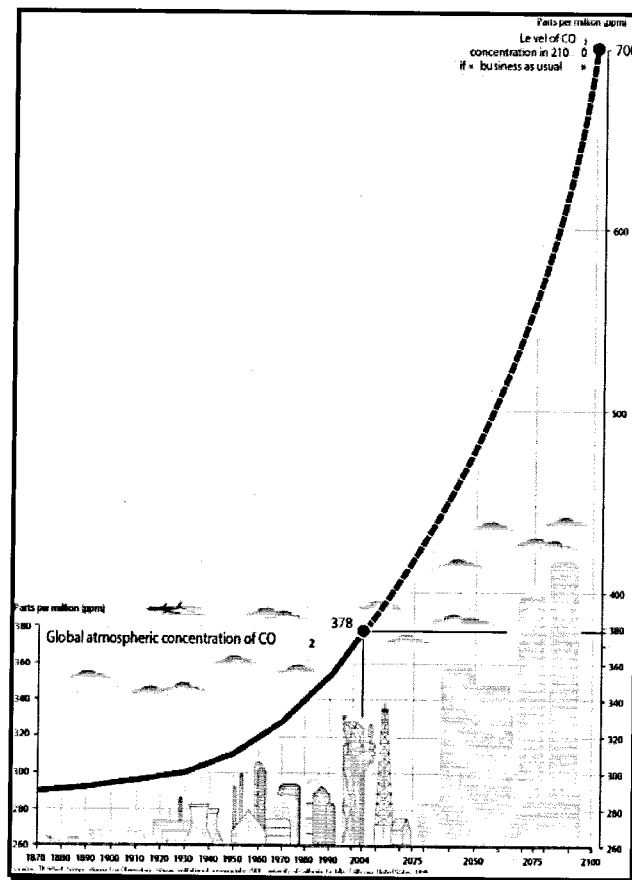
**Imagem 3** – Emissões de gases de efeito de estufa em Portugal, baseado em dados até ano de 1996 e previsto para os restantes anos.<sup>5</sup>

<sup>4</sup> Frase retirada da entrevista a Nuno Ribeiro da Silva, publicada na revista Visão a 4 de Maio de 2006.

<sup>5</sup> Imagem retirada de <http://maps.grida.no>

Nas emissões de gases de efeito de estufa, as principais preocupações recaem sobre o dióxido de carbono uma vez que o volume das suas emissões para a atmosfera representa cerca de 55% do total das emissões de gases de efeito estufa e o tempo da sua permanência na mesma é de, pelo menos, 10 décadas.

Estas emissões de CO<sub>2</sub> decorrem sobretudo da queima de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural, realizadas em centrais termoelétricas, indústrias, veículos em circulação e sistemas domésticos de aquecimento. Por outro lado, os reservatórios naturais que têm a propriedade de absorver o CO<sub>2</sub> do ar são também afectados pela acção humana, mais concretamente em queimadas e desflorestação.



**Imagem 4** – Aumento da concentração dos níveis de CO<sub>2</sub> na atmosfera de 1870 a 2004 e uma previsão a partir desta data até ao ano de 2100 caso não seja feito nada. <sup>6</sup>

<sup>6</sup> Imagem retirada de <http://maps.grida.no>

A redução das emissões deverá acontecer em várias actividades económicas. O Protocolo estimula os países signatários a cooperarem entre si, através de algumas acções básicas:

- Reformar os sectores de energia e transportes;
- Promover o uso de fontes energéticas renováveis;
- Eliminar mecanismos financeiros e de mercado inapropriados aos fins da Convenção;
- Limitar as emissões de metano no gerenciamento de resíduos e dos sistemas energéticos;
- Proteger florestas e outros sumidouros de carbono.

As sanções a aplicar, previstas no Protocolo, na possibilidade do não cumprimento das metas a que os países se propõem, foram definidas sobre a forma de multas, proporcionais ao número de toneladas acima do limite definido para um determinado país e serão pagas aos países que cumpram os objectivos a que se propuseram.

Portugal comprometeu-se no Protocolo de Kyoto, a não aumentar em mais de 27% as suas emissões de gases de efeito estufa entre 1990 e o período 2008-12. Uma vez que, na última década, Portugal inverteu o lugar exemplar que desempenhava no quadro Europeu no que se refere às emissões de gases de efeito estufa, pois dados de 2001 mostram que Portugal já estava 9,4% acima dos limites de Quioto e com tendência para aumentar. Em face disto são apontadas pesadas multas anuais para Portugal, entre os 200 e os 400 milhões de Euros, caso as indústrias abrangidas pela regulamentação não consigam reduzir os seus valores de emissão de gases com efeito de estufa. É bom não esquecer que a estas multas terão de ser acrescidos os efeitos do aumento de custos e a consequente perda de posição competitiva da indústria portuguesa.

Por tanto, é imprescindível e urgente reduzir o consumo de energias poluentes e substituí-las por fontes de energia "limpa" e renovável, melhorando radicalmente a eficiência do nosso consumo energético. Reduzir o consumo de energia, através da poupança e da eficiência, é tão necessário como substituir as fontes de energia poluente por "limpa" e renovável. Independentemente das energias renováveis, devemos sempre procurar uma redução do



impacto do nosso consumo energético sobre o meio ambiente local e global fazendo um uso mais eficiente da energia.

As Energias Renováveis em Portugal estão porem muito aquém da sua contribuição potencial, apesar de Portugal ser um dos países da União Europeia com maior contribuição das Energias Renováveis. As energias hidroeléctrica e da biomassa constituem as principais fontes renováveis utilizadas no nosso país, ambos tradicionais e basicamente independentes do esforço que se tem feito nos últimos anos para promover seriamente as Energias Renováveis em Portugal, sendo a energia eólica e a energia solar as fontes objecto duma atenção renovada mais recente. Por último, os recursos geotérmicos e a energia dos mares constituem fontes de energia ainda pouco exploradas no nosso país apesar do seu grande potencial.

O único inconveniente das energias renováveis é o facto de não termos a capacidade de aumentar ou reduzir a produção, num determinado instante. Daí a melhor solução ser uma diversificação na produção.

Em Portugal os incentivos às energias renováveis ainda são, em alguns casos pouco aliantes, tendendo, num futuro não muito distante, a tornar-se cada vez mais, atractivo tendo em conta as previsões do preço do petróleo. Pois *"o custo para os consumidores das energias renováveis não está sujeito a variações brutais a que outras fontes estão sujeitas"*<sup>7</sup>.

No futuro, vai haver um ponto em que o *"preço do petróleo tornará todos os investimentos em tecnologias para a produção de energias renováveis rentáveis"*<sup>7</sup>.

Actualmente em Portugal os tipos de energias renováveis ou alternativas que se podem deduzir no IRS, dividem-se em:

- o Radiação solar directa ou difusa;
- o Energia contida nos resíduos florestais ou agrícolas;
- o Energia eólica.

Seguramente que, num futuro próximo, os países desenvolvidos procurarão, sem perda de qualidade de vida, consumir menos energia fóssil per-capita.

## Energia Eólica em Portugal

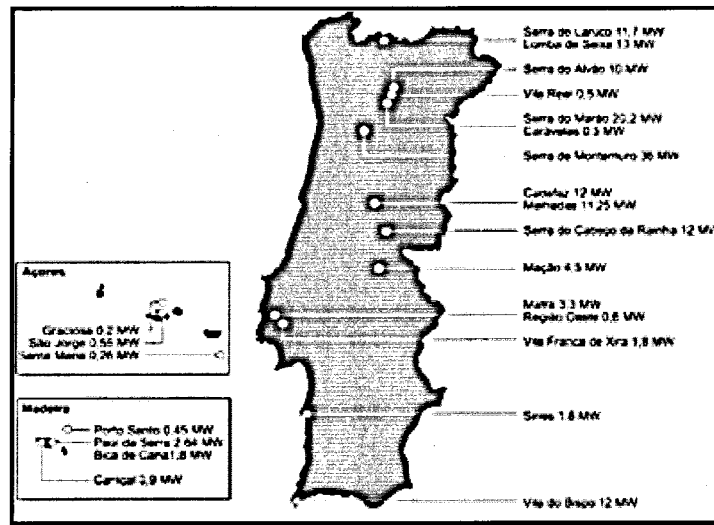
---

<sup>7</sup> Retirado do Diário de Notícias de 2006/05/29, Secção economia, Notícia "Energia Renovável ainda é cara".

A mais mediática das "energias renováveis" é neste momento a produção de electricidade a partir de **energia eólica**.

Actualmente Portugal tem uma distribuição de parques eólicos que abrange quase todo o território nacional com aproximadamente 1.131 MW de potência instalada até Fevereiro 2006: 106 parques eólicos e 703 turbinas eólicas.

Em Portugal cerca de metade dos parques eólicos (48%) são parques pequenos, com potências entre 1 a 10 MW, 31% dos parques têm uma dimensão média, com potências entre 10 a 25 MW.



**Imagem 5** – Mapa der alguns dos parques eólicos existentes em Portugal.<sup>8</sup>

O ano 2005 caracterizou-se por um grande dinamismo quanto à entrada em actividade de novos parques eólicos. No total, em Dezembro de 2005 estavam ligados mais trinta e cinco parques do que no final de 2004, cinco dos quais, e grande dimensão.

<sup>8</sup> Retirado de [www.energiasrenovaveis.com](http://www.energiasrenovaveis.com).

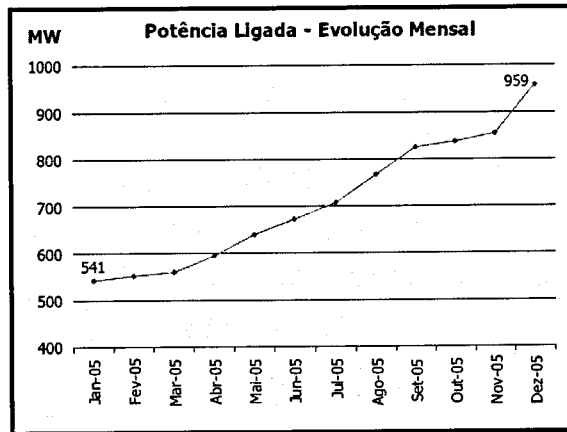
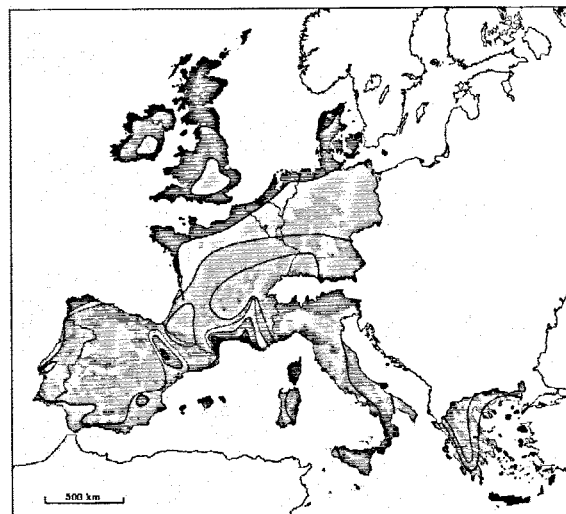


Imagem 6 – Evolução da Potência Instalada no ano de 2005.<sup>9</sup>

O recurso energético eólico "onshore" disponível em Portugal estima-se nos 4.800 MW, tendo em conta um cenário de restrição ambiental moderada.



Wind resources <sup>1</sup> at 60 metres above ground level for five different topographic conditions										
	Sheltered terrain <sup>2</sup>		Open plain <sup>3</sup>		At a sea coast <sup>4</sup>		Open sea <sup>5</sup>		Hills and ridges <sup>6</sup>	
	ms <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>	ms <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>	ms <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>	ms <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>	ms <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>
■	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
■	6.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
■	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.0-10.0	700-1200
■	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
■	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

Imagem 7 – Recursos de vento "Onshore".

<sup>9</sup> Dados retirados de documento da REN com o título "A energia eólica em 2005"

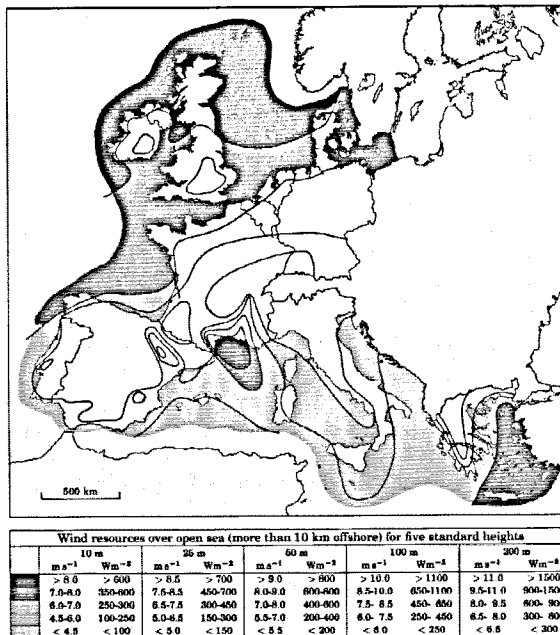


Imagem 8 – Recursos de vento "Offshore".

Apesar deste potencial, existiram uma série de barreiras que contribuíram para o fraco desenvolvimento da energia eólica em Portugal:

**Ligação a rede:** uma vez que os locais com maior potencial se encontram em locais remotos ou servidos por redes fracas, muitas vezes o escoamento de energia só é conseguido através da construção de novas linhas, o que eleva os custos ou até inviabiliza as operações, sendo também problemática a gestão da atribuição dos pontos de interligação;

**Impacte ambiental:** as principais incidências ambientais habitualmente apontadas são o ruído, o impacto visual e a influência na fauna avícola, no entanto a evolução tecnológica (diminuição dos ruídos, turbinas mais potentes, e menor número de unidades a instalar) contribuirá para uma melhor compatibilização, os dois interesses;

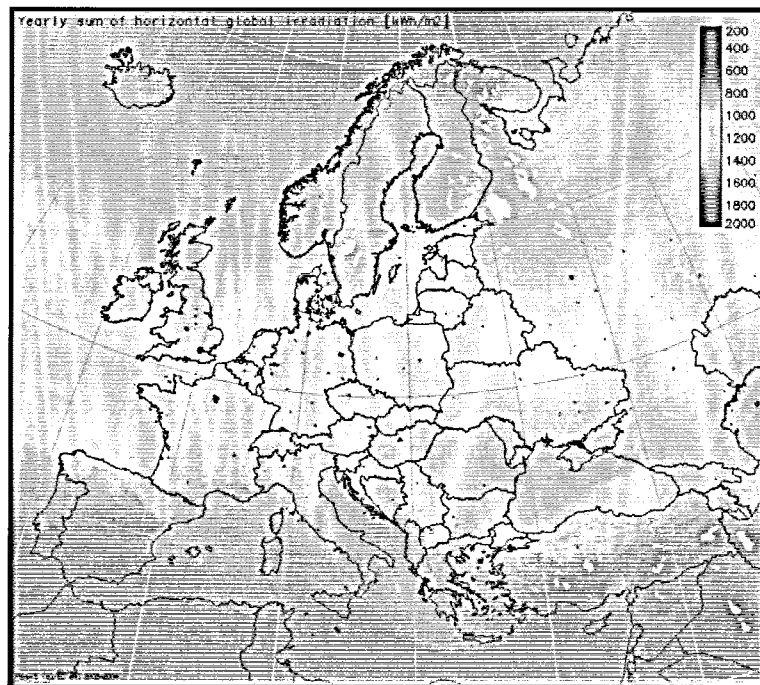
**Procedimentos burocráticos:** os trâmites administrativos de um projecto de energia eólica são complexos, demasiado burocráticos e morosos, envolvendo vários organismos.

Tendo em conta a necessidade do cumprimento da Directiva Comunitária, respeitante ao Protocolo de Kyoto, assim como as recentes medidas de apoio, como a remuneração da energia produzida para níveis perto do praticado nos países Europeus, prevê-se a instalação de cerca de 4.500 MW de capacidade de geração em energia eólica.

A energia eólica mostra-se como uma das fontes renováveis com maior potencialidade e maior desenvolvimento futuro, não apenas pelas metas estabelecidas, mas também pelo interesse que desperta nas entidades e empresas, além do retorno financeiro bastante atractivo.

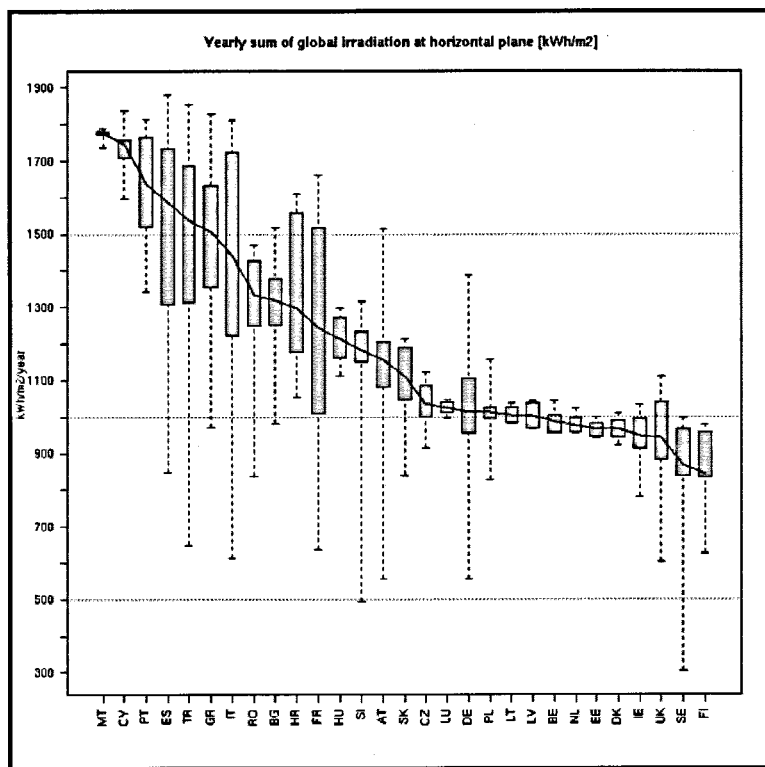
## Energia Solar em Portugal

Portugal é um dos países da Europa com maior disponibilidade de radiação solar. Uma forma de dar ideia desse facto é em termos do número médio anual de horas de Sol, que varia entre 2.200 e 3.000 para Portugal e, por exemplo, para Alemanha varia entre 1.200 e 1.700 h. Contudo, este recurso tem sido mal aproveitado para usos tipicamente energéticos.



**Imagem 9** – Irradiação horizontal da Europa.

O país, devido às suas condições climáticas, possui excelentes condições para a conversão fotovoltaica com índices de produção entre 1000 e os 1500 KWh por ano, por cada KWp instalado.



**Gráfico 28** – Irradiação horizontal plana de cada país da Europa.

As principais aplicações de sistemas fotovoltaicos em Portugal centram-se nas áreas das telecomunicações, sinalização, electrificação rural e bombagem de água para irrigação, com cerca de 1.000 kWp instalados em 2001, distribuídos por:

- 52% sector doméstico (sistemas isolados da rede);
- 20% nos serviços (redes telemóveis, SOS, parquímetros, etc.);
- 26% sistema ligado à rede;
- 2% sistemas de I&D.

Várias são as razões apontadas para o fraco desenvolvimento da energia solar em Portugal:

- o Algumas más experiências no primeiro período de expansão do solar (década de 80), associadas à falta de qualidade dos equipamentos e, sobretudo, das instalações, o que afectou negativamente a sua imagem;
- o Falta de informação específica sobre as razões do interesse e das possibilidades desta tecnologia junto dos seus potenciais utilizadores;
- o Custo elevado do investimento inicial, desencorajando a adopção de uma solução que pode competir com as alternativas convencionais;
- o Barreiras técnicas e tecnológicas à inovação ao nível da indústria da construção e da instalação de equipamentos térmicos;
- o Insuficiência e inadequação das medidas de incentivo.

Até este momento, situação do mercado em Portugal, tem contrastado com a tendência de expansão que se observa na maior parte dos nossos parceiros europeus. A título comparativo, a Alemanha, onde a radiação solar é muito inferior à nossa (pouco mais de metade em termos médios anuais), é hoje o líder na Europa com mais de 4 milhões de m<sup>2</sup> de colectores térmicos instalados e campanhas de incentivos do solar fotovoltaico como a campanha dos "100.000 tectos solares". A Grécia, país muito semelhante a Portugal em termos económicos, energéticos e populacionais, tem um mercado interno anual de solar térmico de 30 vezes superior ao nosso, com cerca de 3 milhões de m<sup>2</sup> de colectores térmicos instalados.

O futuro cenário da energia solar configura com algumas mudanças a médio prazo. Prevê-se a promoção da produção de electricidade a partir do solar fotovoltaico, tendo em atenção a Directiva sobre a produção de energia eléctrica a partir de fontes renováveis, prevendo-se como meta os 50 MWp de potência fotovoltaica instalada em 2010, o que nos colocará ao nível, ou mesmo acima, dos outros países da União Europeia, em termos de potência fotovoltaica instalada per-capita (actualmente de apenas 0,1 W per-capita).

Em Portugal os dois principais vectores de desenvolvimento dos sistemas fotovoltaicos serão os sistemas ligados à rede eléctrica e os sistemas autónomos destinados a electrificação de sistemas isolados.

## 6.2 ANEXO II - SÉRIES

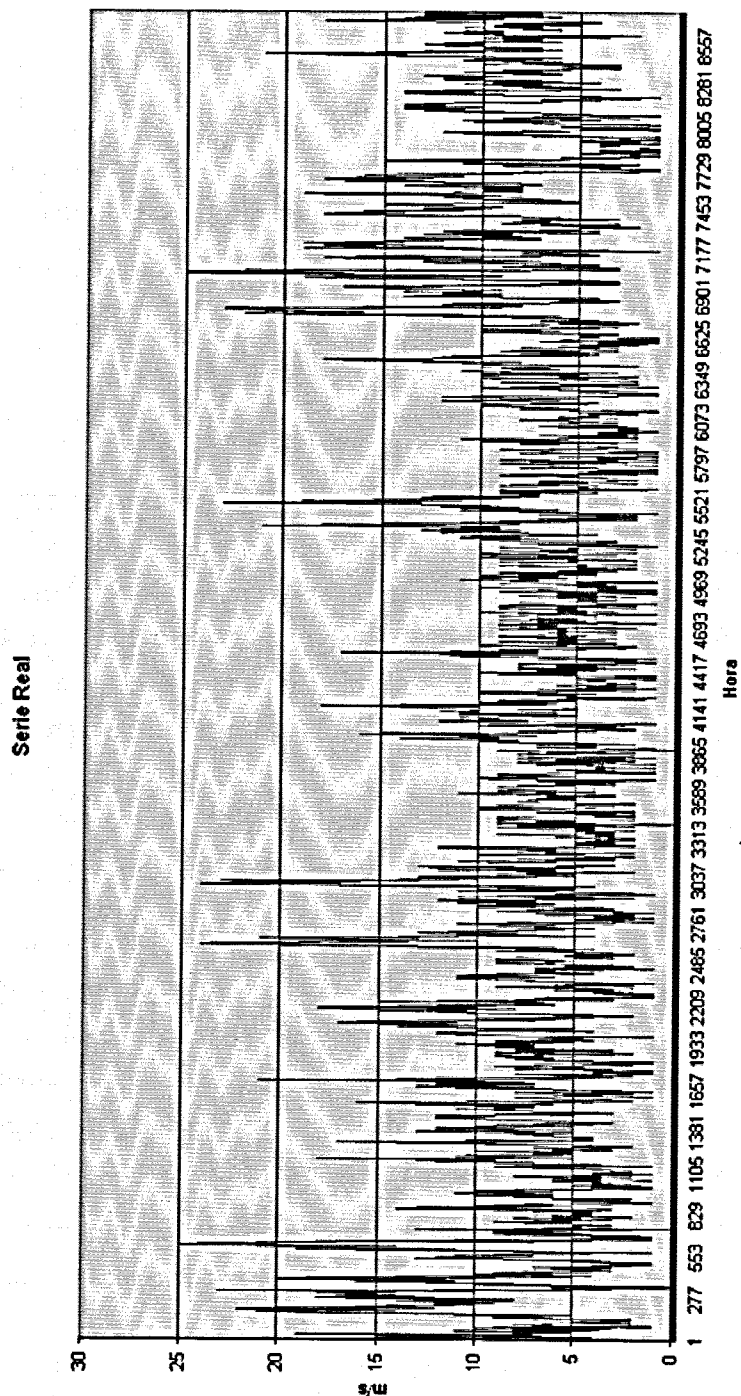


Gráfico da série real do vento utilizada neste estudo.



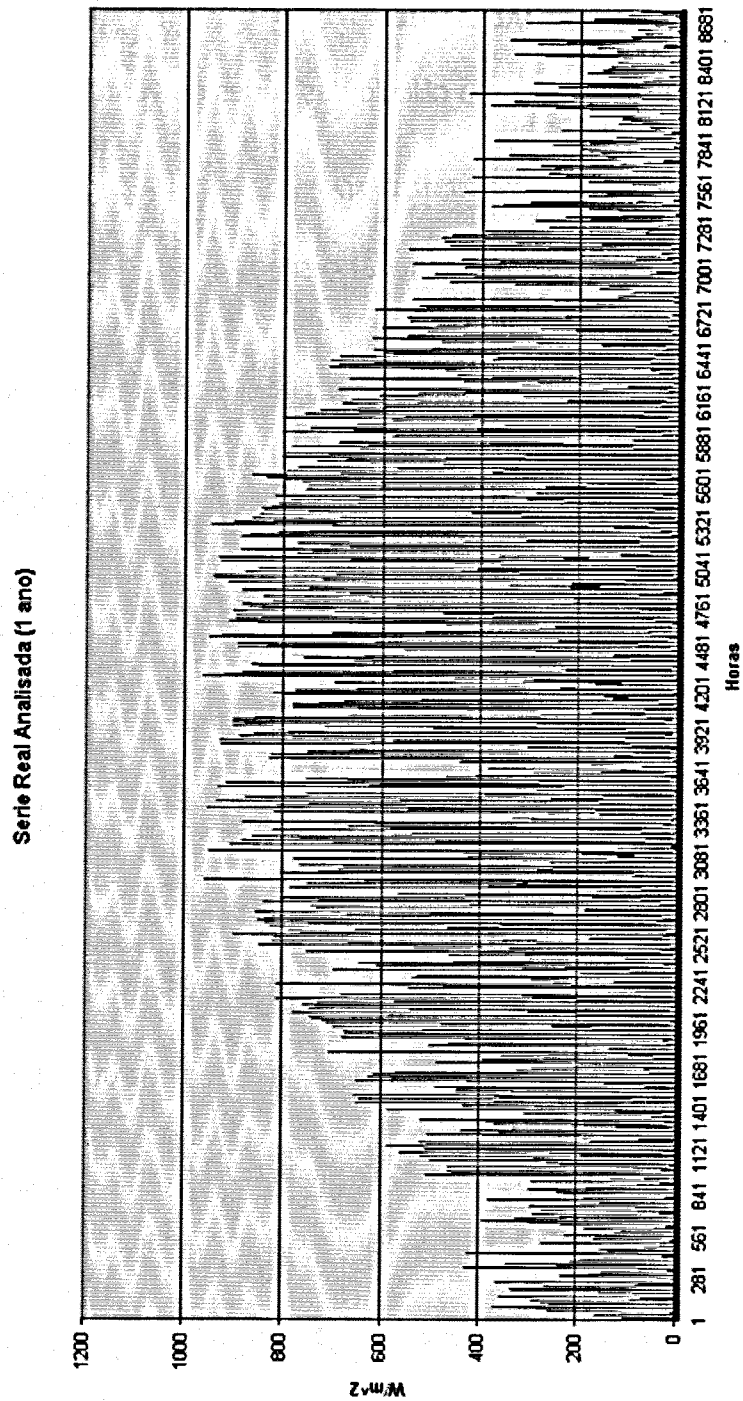


Gráfico da série real da radiação solar utilizada neste estudo.

## 6.3 ANEXO III – VISUAL BASIC

Código *Visual Basic* para cálculo das séries de vento:

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
  
Dim i, j, k, l, m As Integer  
Dim vento1, vento2, vento3, vento4 As Single  
  
vento1 = Cells(5, 3)  
vento2 = Cells(5, 4)  
  
For i = 1 To 4380  
  
    vento1 = ProxVal1(vento1)  
    vento2 = ProxVal2(vento2)  
  
    Cells(i + 4, 9) = vento1  
    Cells(i + 4, 10) = vento2  
  
Next  
  
End Sub  
  
'probabilidade acumulada do 1 semestre  
  
Function ProxVal1(UltVal1)  
Dim a As Single  
Dim col As Integer  
Dim linha As Integer  
Dim PA1  
Randomize  
  
a = Math.Rnd()  
  
linha = 72  
  
col = UltVal1 + 40  
  
PA1 = Worksheets("Semestral").Cells(linha, col)  
  
Do While PA1 <= a  
  
    linha = linha + 1  
  
    PA1 = Worksheets("Semestral").Cells(linha, col)  
  
Loop  
  
ProxVal1 = Worksheets("Semestral").Cells(linha, 39)  
  
End Function  
  
'probabilidade acumulada do 2 semestre
```

```
Function ProxVal2(UltVal2)
Dim a As Single
Dim col As Integer
Dim linha As Integer
Dim PA2
Randomize

a = Math.Rnd()

linha = 72

col = UltVal2 + 68

PA2 = Worksheets("Semestral").Cells(linha, col)

Do While PA2 <= a

linha = linha + 1

PA2 = Worksheets("Semestral").Cells(linha, col)
Loop

ProxVal2 = Worksheets("Semestral").Cells(linha, 67)

End Function
```

Código *Visual Basic* para cálculo das séries de radiação solar:

```
Private Sub CommandButton1_Click()

Dim t As Single

Dim u As Single

u = 1

For t = 0 To 8759

u = Cells(3 + (t * 6), 3)

Cells(3 + t, 6) = u

Next

End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()

Dim r As Single
Dim a1 As Single
Dim a2 As Single
Dim a3 As Single
Dim a4 As Single
Dim a5 As Single
Dim a6 As Single
Dim a7 As Single
```

*Dim a8 As Single*  
*Dim a9 As Single*  
*Dim a10 As Single*  
*Dim a11 As Single*  
*Dim a12 As Single*  
*Dim a13 As Single*  
*Dim a14 As Single*  
*Dim a15 As Single*  
*Dim a16 As Single*  
*Dim a17 As Single*  
*Dim a18 As Single*  
*Dim a19 As Single*  
*Dim a20 As Single*  
*Dim a21 As Single*  
*Dim a22 As Single*  
*Dim a23 As Single*  
*Dim a24 As Single*

*For r = 0 To 364*

*a1 = Cells(3 + (r \* 24), 6)*  
*a2 = Cells(4 + (r \* 24), 6)*  
*a3 = Cells(5 + (r \* 24), 6)*  
*a4 = Cells(6 + (r \* 24), 6)*  
*a5 = Cells(7 + (r \* 24), 6)*  
*a6 = Cells(8 + (r \* 24), 6)*  
*a7 = Cells(9 + (r \* 24), 6)*  
*a8 = Cells(10 + (r \* 24), 6)*  
*a9 = Cells(11 + (r \* 24), 6)*  
*a10 = Cells(12 + (r \* 24), 6)*  
*a11 = Cells(13 + (r \* 24), 6)*  
*a12 = Cells(14 + (r \* 24), 6)*  
*a13 = Cells(15 + (r \* 24), 6)*  
*a14 = Cells(16 + (r \* 24), 6)*  
*a15 = Cells(17 + (r \* 24), 6)*  
*a16 = Cells(18 + (r \* 24), 6)*  
*a17 = Cells(19 + (r \* 24), 6)*  
*a18 = Cells(20 + (r \* 24), 6)*  
*a19 = Cells(21 + (r \* 24), 6)*  
*a20 = Cells(22 + (r \* 24), 6)*  
*a21 = Cells(23 + (r \* 24), 6)*  
*a22 = Cells(24 + (r \* 24), 6)*  
*a23 = Cells(25 + (r \* 24), 6)*  
*a24 = Cells(26 + (r \* 24), 6)*

*Cells(3 + r, 9) = a1*  
*Cells(3 + r, 10) = a2*  
*Cells(3 + r, 11) = a3*  
*Cells(3 + r, 12) = a4*  
*Cells(3 + r, 13) = a5*  
*Cells(3 + r, 14) = a6*  
*Cells(3 + r, 15) = a7*  
*Cells(3 + r, 16) = a8*  
*Cells(3 + r, 17) = a9*  
*Cells(3 + r, 18) = a10*  
*Cells(3 + r, 19) = a11*  
*Cells(3 + r, 20) = a12*  
*Cells(3 + r, 21) = a13*

```
Cells(3 + r, 22) = a14  
Cells(3 + r, 23) = a15  
Cells(3 + r, 24) = a16  
Cells(3 + r, 25) = a17  
Cells(3 + r, 26) = a18  
Cells(3 + r, 27) = a19  
Cells(3 + r, 28) = a20  
Cells(3 + r, 29) = a21  
Cells(3 + r, 30) = a22  
Cells(3 + r, 31) = a23  
Cells(3 + r, 32) = a24
```

Next

End Sub

Private Sub CommandButton3\_Click()

Dim a, b, c As Single

Dim m1, m2, m3, m4, m5, m6, m7, m8, m9, m10, m11, m12 As Single

r = 0

'janeiro

For m1 = 1 To 31

For b = 0 To 23

Cells(3 + r, 61) = Cells(3, 35 + b)

r = r + 1

Next

Next

'fevereiro

For m2 = 1 To 28

For b = 0 To 23

Cells(3 + r, 61) = Cells(4, 35 + b)

r = r + 1

Next

Next

'março

For m3 = 1 To 31

For b = 0 To 23

Cells(3 + r, 61) = Cells(5, 35 + b)

r = r + 1

Next

Next

'abril

For m4 = 1 To 30

For b = 0 To 23

Cells(3 + r, 61) = Cells(6, 35 + b)

r = r + 1

Next

Next

```
'maio
For m5 = 1 To 31
  For b = 0 To 23

    Cells(3 + r, 61) = Cells(7, 35 + b)
    r = r + 1
  Next
Next

'Junho
For m6 = 1 To 30
  For b = 0 To 23

    Cells(3 + r, 61) = Cells(8, 35 + b)
    r = r + 1
  Next
Next

'julho
For m7 = 1 To 31
  For b = 0 To 23

    Cells(3 + r, 61) = Cells(9, 35 + b)
    r = r + 1
  Next
Next

'agosto
For m8 = 1 To 31
  For b = 0 To 23

    Cells(3 + r, 61) = Cells(10, 35 + b)
    r = r + 1
  Next
Next

'setembro
For m9 = 1 To 30
  For b = 0 To 23

    Cells(3 + r, 61) = Cells(11, 35 + b)
    r = r + 1
  Next
Next

'outubro
For m10 = 1 To 31
  For b = 0 To 23

    Cells(3 + r, 61) = Cells(12, 35 + b)
    r = r + 1
  Next
Next

'novembro
For m11 = 1 To 30
  For b = 0 To 23

    Cells(3 + r, 61) = Cells(13, 35 + b)
```

```
    r = r + 1
  Next
Next

'dezembro
For m12 = 1 To 31
  For b = 0 To 23

    Cells(3 + r, 61) = Cells(14, 35 + b)
    r = r + 1
  Next
Next

End Sub
```

---

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
Dim p As Single
Dim r As Single
Dim x As Single
Dim y As String
Dim w As Date
Dim v As Date
```

```
x = 1
y = 1
w = 1
p = 0
```

```
For r = 0 To 54560
```

```
  p = p + 1
  v = Cells(3 + r, 1)
  w = Cells(2 + p, 3)
```

```
If w = v Then
```

```
  Cells(2 + p, 4) = Cells(3 + r, 2)
```

```
Else
```

```
  Do Until w = v
```

```
    p = p + 1
    w = Cells(2 + p, 3)
```

```
  Loop
```

```
  Cells(2 + p, 4) = Cells(3 + r, 2)
```

```
End If
```

```
Next
```

```
For x = 0 To 52560
```

```
  y = Cells(3 + x, 4)
```

```
If y = "" Then
    Cells(3 + x, 5) = Cells(3 + x - 144, 5)
Else
    Cells(3 + x, 5) = Cells(3 + x, 4)
End If
Next
End Sub
```

---

```
Private Sub CommandButton1_Click()

Dim r, i, j As Integer

r = 0

'Janeiro
For i = 1 To 31

    For j = 1 To 24

        Cells(3 + r, 2) = Cells(5 + j, 8 + i)
        r = r + 1

    Next

Next

'Fevereiro
For i = 1 To 28

    For j = 1 To 24

        Cells(3 + r, 2) = Cells(35 + j, 8 + i)
        r = r + 1

    Next

Next

'Março
For i = 1 To 31

    For j = 1 To 24

        Cells(3 + r, 2) = Cells(65 + j, 8 + i)
        r = r + 1

    Next

Next

'Abri
```



*For j = 1 To 24*

*Cells(3 + r, 2) = Cells(95 + j, 8 + i)*  
*r = r + 1*

*Next*

*Next*

*'Maio*

*For i = 1 To 31*

*For j = 1 To 24*

*Cells(3 + r, 2) = Cells(125 + j, 8 + i)*  
*r = r + 1*

*Next*

*Next*

*'Junho*

*For i = 1 To 30*

*For j = 1 To 24*

*Cells(3 + r, 2) = Cells(155 + j, 8 + i)*  
*r = r + 1*

*Next*

*Next*

*'Julho*

*For i = 1 To 31*

*For j = 1 To 24*

*Cells(3 + r, 2) = Cells(185 + j, 8 + i)*  
*r = r + 1*

*Next*

*Next*

*'Agosto*

*For i = 1 To 31*

*For j = 1 To 24*

*Cells(3 + r, 2) = Cells(215 + j, 8 + i)*  
*r = r + 1*

*Next*

*Next*

*'Setembro*

*For i = 1 To 30*

*For j = 1 To 24*

*Cells(3 + r, 2) = Cells(245 + j, 8 + i)*  
*r = r + 1*

*Next*

*Next*

*'Outubro*

*For i = 1 To 31*

*For j = 1 To 24*

*Cells(3 + r, 2) = Cells(275 + j, 8 + i)*  
*r = r + 1*

*Next*

*Next*

*'Novembro*

*For i = 1 To 30*

*For j = 1 To 24*

*Cells(3 + r, 2) = Cells(305 + j, 8 + i)*  
*r = r + 1*

*Next*

*Next*

*'Dezembro*

*For i = 1 To 31*

*For j = 1 To 24*

*Cells(3 + r, 2) = Cells(335 + j, 8 + i)*  
*r = r + 1*

*Next*

*Next*

*End Sub*

*Private Sub CommandButton2\_Click()*

*Dim m As Single*

*For m = 0 To 364*

*Cells(3 + m, 53) = Cells(3 + (m \* 24), 56)*  
*Cells(3 + m, 54) = Cells(3 + (m \* 24), 57)*

*Next*

*End Sub*



## 6.4 ANEXO V – RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE

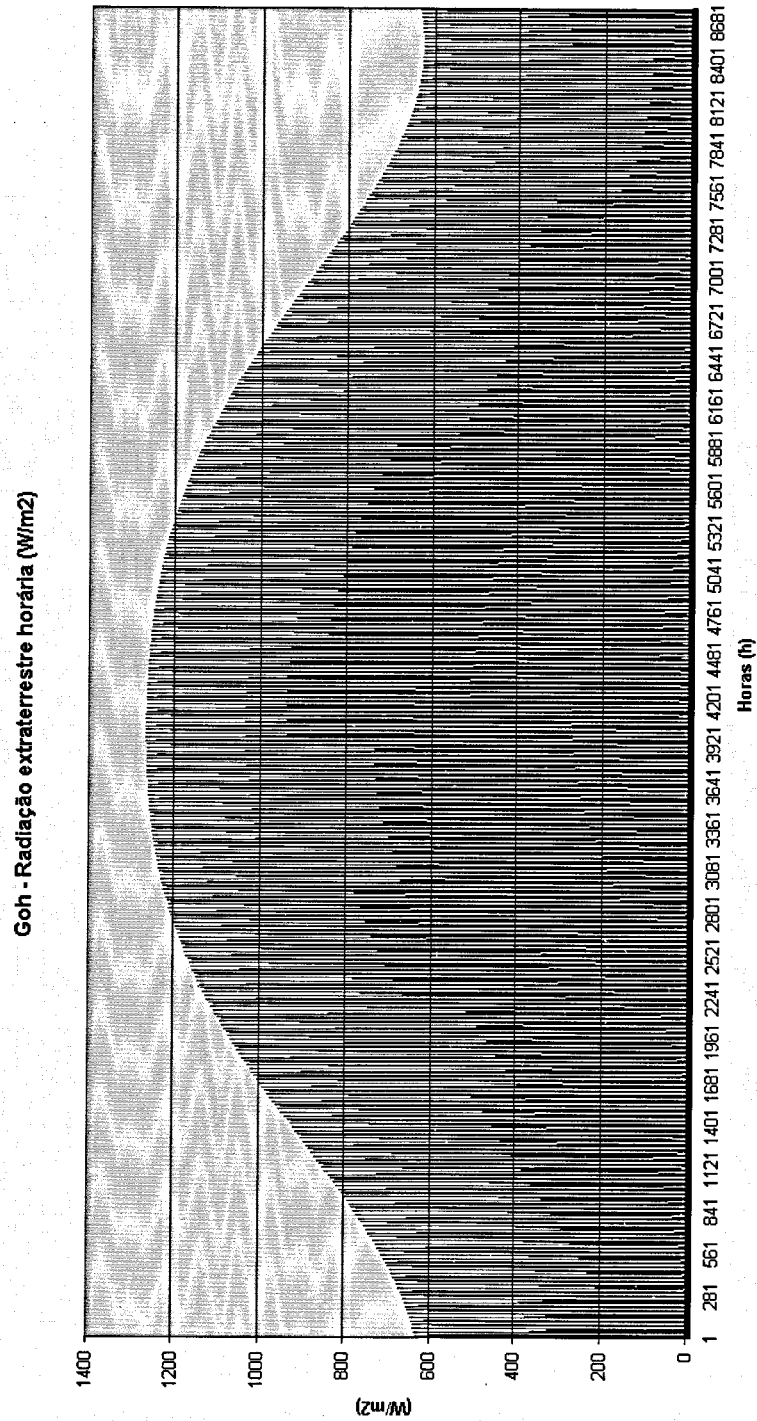


Gráfico da radiação extraterrestre horária numa superfície horizontal em  $W/m^2$ .



FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000104949