

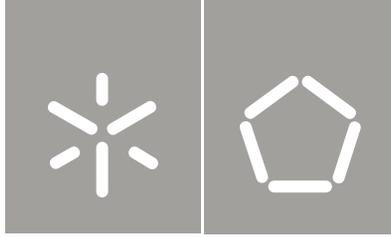


**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Marta Cristina da Costa Silva

**Estudo Comparativo de um Painel  
Solar Fotovoltaico Fixo vs Móvel**





**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Marta Cristina da Costa Silva

**Estudo Comparativo de um Painel  
Solar Fotovoltaico Fixo vs Móvel**

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de  
Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do  
**Professor Doutor Manuel João Sepúlveda  
Mesquita de Freitas**

**Professor Doutor Jorge José Gomes Martins**

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO,  
MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Guimarães, \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_

*À minha filha Alice*



# Agradecimentos

Aos meus orientadores Doutor Jorge Martins e Doutor Manuel Sepúlveda, pela ajuda prestada e pelas suas sugestões.

Em especial, quero agradecer à Direção da Escola Profissional CIOR pela disponibilização dos meios e equipamentos, sem os quais não teria sido possível realizar este trabalho.

Deixo também um agradecimento a alguns colegas e funcionários da CIOR. Um agradecimento especial ao Eng. Manuel Vieira e ao Prof. Armindo Evangelista por toda a ajuda prestada, apoio e amizade ao longo deste trabalho, nomeadamente na montagem do sistema no telhado da CIOR. Ao Nuno Pinho, estagiário de informática, pela ajuda em arranjar o computador que serviu para o trabalho. Ao Sr. Carneiro pela construção das bases de cimento para fixação dos painéis fotovoltaicos e pela ajuda no transporte dos equipamentos para o telhado. À D. Teresa, D. Angelina, D. Lurdes pela sua boa disposição contagiante logo pela manhã.

Aos meus pais por toda a ajuda e incentivo que sempre me deram para continuar com a minha formação.

À D. Cândida e ao Sr. Francisco por tomarem conta da Alice enquanto escrevia a dissertação.

Ao Doutor Carlos Afonso pelo esclarecimento de algumas dúvidas relativas ao capítulo 2 e pela revisão do capítulo.

Ao Luiz pelo apoio, incentivo nas horas de maior desânimo e paciência ao longo de todo este trabalho.



# Resumo

A aposta nas energias renováveis é cada vez maior devido aos problemas ambientais e à preocupação com a sustentabilidade energética. Contudo, ainda há muito potencial por explorar. No campo da energia solar fotovoltaica uma das formas de se aproveitar mais a radiação solar passa pela utilização de sistemas que seguem o sol, chamados de seguidores solares e que podem ser de um ou de dois eixos.

Esta dissertação tem como objetivo fazer um estudo comparativo de um painel solar fotovoltaico fixo com um painel solar fotovoltaico móvel de um eixo. Inicialmente são explicados conceitos relativos à energia solar e aos sistemas e tecnologias solar fotovoltaica. Também se descreve como foi implementado o sistema de monitorização que tem como objetivo medir e registar os valores de tensão e corrente do painel solar fotovoltaico fixo e do painel solar fotovoltaico móvel. A partir desses dados medidos, são calculados e apresentados os valores de potência para ambos os painéis solares fotovoltaicos ao longo do dia, para vários dias, e é feita a comparação da produção de energia entre os dois. Também é feita uma análise do comportamento dos painéis fotovoltaicos perante algumas condições ambientais. Finalmente é apresentado um estudo financeiro para um sistema fotovoltaico fixo e móvel de 4,6 kW, e também para um sistema fotovoltaico fixo e móvel de 200 W, para venda de energia para a rede elétrica, onde se pretende constatar se a aquisição de um seguidor solar é vantajosa do ponto de vista económico.

**Palavras-Chave:** Energia Solar Fotovoltaica, Painel Fotovoltaico Fixo, Painel Fotovoltaico Móvel, Seguidor Solar.



# Abstract

The investment in renewable energy is growing due to environmental problems and concerns with energy sustainability. However, there is still much potential to explore. In the field of solar photovoltaic energy one of the ways to get more solar radiation passes through the use of solar systems which follow the sun, called solar trackers, and that can be of one or two axes.

This dissertation has the objective of making a comparative study between a fixed solar photovoltaic panel and a one axis mobile solar photovoltaic panel. Initially are explained concepts concerning to solar energy and to solar photovoltaic systems and technologies. It is also described how was implemented the monitoring system which has as objective to measure and register the values of voltage and current of the fixed solar photovoltaic panel and of the mobile solar photovoltaic panel. From these measured values are calculated and presented the values of power during the day for both solar photovoltaic panels, along many days, and is compared the energy production between them. It is also made a behavior analysis of the photovoltaic panels for some environmental conditions. Finally, it is presented a financial study for a fixed and mobile photovoltaic system of 4.6 kW, and also for a fixed and mobile photovoltaic system of 200 W, to sell energy to the electrical power grid, which intends to determine if it is advantageous to acquire a solar tracker.

**Keywords:** Solar Photovoltaic Energy, Fixed Photovoltaic Panel, Mobile Photovoltaic Panel, Solar Tracker.



# Índice

Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	v
Abstract .....	vii
Lista de Figuras .....	xii
Lista de Tabelas .....	xvi
Lista de Acrónimos .....	xvii
Nomenclatura .....	xviii
CAPÍTULO 1 Introdução .....	1
1.1. História da Energia Solar Fotovoltaica .....	1
1.2. Produção de Energia Elétrica .....	2
1.3. Importância da Energia Solar Fotovoltaica .....	6
1.4. Motivações .....	9
1.5. Objetivos .....	10
1.6. Organização da Dissertação .....	10
CAPÍTULO 2 Energia Solar .....	11
2.1. Introdução .....	11
2.2. Considerações Sobre o Movimento da Terra .....	11
2.3. A Terra e a Esfera Celeste .....	12
2.4. Coordenadas Geográficas e Astronómicas .....	14
2.4.1. Coordenadas Geográficas: Latitude e Longitude .....	14
2.4.2. Coordenadas Astronómicas .....	15
2.5. Unidades de Medida de Tempo .....	15
2.5.1. Tempo Solar .....	15
2.5.2. Fusos Horários .....	16
2.5.3. Equação do Tempo .....	17
2.5.4. Conversão do Tempo .....	17
2.6. Ângulos Solares .....	18
2.6.1. Declinação Solar .....	18
2.6.2. Ângulo Horário Solar .....	19
2.6.3. Azimute Solar .....	20
2.6.4. Altura Solar .....	20
2.7. Radiação Solar .....	21
2.7.1. Radiação Global, Direta, Difusa e Refletida .....	22

---

2.7.2. Massa de Ar .....	23
2.7.3. Medição da Radiação Solar.....	23
2.8. Orientação dos Painéis Fotovoltaicos .....	24
2.9. Conclusões.....	25
CAPÍTULO 3 Sistemas Solares Fotovoltaicos.....	26
3.1. Introdução.....	26
3.2. Sistemas Solares Fotovoltaicos.....	26
3.2.1. Sistema Solar Fotovoltaico Autónomo .....	26
3.2.2. Sistema Solar Fotovoltaico Ligado à Rede Elétrica.....	27
3.2.3. Sistema Solar Fotovoltaico Híbrido .....	28
3.2.4. Tipos de Equipamentos Utilizados nos Sistema Solares Fotovoltaicos .....	28
3.3. Tecnologia Solar Fotovoltaica .....	30
3.3.1. Tipos de Células Fotovoltaicas .....	30
3.3.2. Funcionamento de uma Célula Fotovoltaica de Silício.....	33
3.3.3. Circuito Equivalente de uma Célula Fotovoltaica.....	34
3.3.4. Parâmetros e Curvas Características dos Painéis Fotovoltaicos.....	36
3.3.6. Efeitos do Sombreamento, da Temperatura e do Vento.....	37
3.4. Sistemas de Seguimento do Sol.....	38
3.4.1. Seguidores Solares de Um Eixo e de Dois Eixos.....	39
3.4.2. Tecnologia dos Sistemas de Controlo .....	40
3.4.3. Parâmetros de um Seguidor Solar .....	40
3.5. Conclusões.....	40
CAPÍTULO 4 Projeto e Implementação do Sistema Fotovoltaico .....	41
4.1. Introdução.....	41
4.2. Equipamento e Sistema de Monitorização.....	41
4.2.1. UPS .....	41
4.2.2. Painéis Solares Fotovoltaicos.....	42
4.2.3. Seguidor Solar.....	44
4.2.4. Quadro de Instrumentação .....	45
4.2.5. Placa de Aquisição de Dados .....	47
4.2.6. PCI para Leitura de Tensões .....	48
4.2.7. PCI para Leitura de Correntes.....	50
4.2.8. Cargas Usadas nos Painéis Fotovoltaicos .....	52
4.3. Programa em <i>Labview</i> .....	54

---

4.4. Implementação.....	58
4.4.1. Montagem e Orientação dos Painéis Fotovoltaicos .....	59
4.4.2. Instalação Elétrica.....	61
4.5. Custos dos Equipamentos .....	62
4.6. Página Web.....	63
4.7. Conclusões.....	64
CAPÍTULO 5    Resultados Experimentais.....	65
5.1. Introdução.....	65
5.2. Validação dos Resultados .....	65
5.3. Resultados Obtidos e Análise dos Resultados .....	65
5.4. Análise Financeira .....	73
5.4.1. Sistema de 4,6 kW .....	73
5.4.1. Sistema de 200 W .....	76
5.4. Conclusões.....	79
CAPÍTULO 6    Conclusão e Trabalho Futuro.....	81
6.1. Conclusões.....	81
6.2. Sugestões para Trabalho Futuro .....	82
Referências .....	83
APÊNDICE 1 .....	88
APÊNDICE 2 .....	100

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Dispositivo fotovoltaico descrito por Edmond Bequerel [1].....	1
Figura 1.2 – Tubo usado por William Grylls Adams e Richard Evans Day na investigação do efeito fotovoltaico no Selénio [1].....	1
Figura 1.3 – Primeira célula solar fotovoltaica construída por Charles Fritts [1].....	2
Figura 1.4 – Consumo de energia elétrica no Mundo entre os anos de 1971 e 2009 em Mtoe (Milhões de toe) [10]. .....	3
Figura 1.5 – Emissões de CO <sub>2</sub> por setor no mundo em 2009 [14].....	4
Figura 1.6 – Fontes da produção bruta de energia elétrica em Portugal nos anos de 2008 e 2009.....	4
Figura 1.7 – Produção de energia elétrica a partir da energia fotovoltaica em Portugal. ....	5
Figura 1.8 – Potência instalada de energia fotovoltaica em Portugal. ....	5
Figura 1.9 – Consumo de Potência da Rede Nacional de Transportes (RNT) em 21 de junho de 2011 [22]. .....	6
Figura 1.10 – Potência entregue à Rede Elétrica Nacional (REN) por produção fotovoltaica em 21 de junho de 2011 [23]. .....	7
Figura 1.11 – Potência entregue à Rede Elétrica Nacional (REN) por produção eólica em 21 de junho de 2011 [23].....	7
Figura 1.12 – Consumo de Potência da Rede Nacional de Transportes (RNT) em 7 de dezembro de 2011 [22].....	7
Figura 1.13 – Potência entregue à Rede Elétrica Nacional (REN) por produção fotovoltaica em 7 de dezembro de 2011 [23]. ....	8
Figura 1.14 – Potência entregue à Rede Elétrica Nacional (REN) por produção eólica em 7 de dezembro de 2011 [23].....	8
Figura 1.15 – Mapa de irradiação horizontal solar global da Europa [24]. ....	9
Figura 2.1 – Movimento da Terra à volta do Sol.....	11
Figura 2.2 – Segunda lei de Kepler. ....	12
Figura 2.3 – Representação da Esfera Celeste [29]. ....	13
Figura 2.4 – Representação dos paralelos (a azul) e dos meridianos (a preto) da Terra [29]. ....	13
Figura 2.5 – Latitude e longitude [32].....	14
Figura 2.6 – Fusos horários [33].....	16
Figura 2.7 – Equação do tempo (ET): adiantamento ou atraso (em minutos) do tempo solar verdadeiro em relação ao tempo solar médio, ao longo dos meses do ano [35]. ....	17
Figura 2.8 – Representação da declinação solar ( $\delta_s$ ). ....	19
Figura 2.9 – Representação dos equinócios e solstícios no hemisfério norte [34]. ....	19
Figura 2.10 – Representação do azimute ( $z$ ) e da altura solar no hemisfério norte. ....	20
Figura 2.11 – Altura do Sol ao meio-dia solar no hemisfério norte.....	20
Figura 2.12 – Altura solar no hemisfério norte: (a) No solstício de verão; (b) Nos equinócios; (c) No solstício de inverno [37]. ....	21
Figura 2.13 – Radiação direta, refletida e difusa [35]. ....	22
Figura 2.14 – Efeito da massa de ar na radiação solar recebida na superfície da Terra.....	23

Figura 2.15 – Ângulo indicado para a inclinação dos painéis fotovoltaicos ( $\beta$ ).	24
Figura 2.16 – Ângulo indicado para a inclinação dos painéis fotovoltaicos ( $\beta$ ).	24
Figura 3.1 – Tipos de sistemas solares fotovoltaicos.	26
Figura 3.2 – Estrutura geral de um sistema fotovoltaico autónomo.	27
Figura 3.3 – Estrutura geral de um sistema fotovoltaico ligado à rede elétrica.	28
Figura 3.4 – Estrutura geral de um sistema fotovoltaico híbrido ligado à rede elétrica [44].	28
Figura 3.5 – Regulador de carga solar <i>Steca PR3030</i> com LCD 12/24V 30A [45].	29
Figura 3.6 – Inversor solar fotovoltaico <i>Sunny Boy</i> .	29
Figura 3.7 – Tipos de células fotovoltaicas.	30
Figura 3.8 – Tipos de células fotovoltaicas de silício: (a) Silício monocristalino;	31
Figura 3.9 – Tipos de células fotovoltaicas de filme fino: (a) a-Si; (b) CIGS; (c) CdTe [50].	31
Figura 3.10 – Diferenças entre as células fotovoltaicas de Silício cristalino e de película fina [50].	31
Figura 3.11 – Espectro solar AM1,5 e as partes do espectro que teoricamente podem ser usadas pelas: (a) Células fotovoltaicas de silício; (b) Células fotovoltaicas multijunção [48].	33
Figura 3.12 – Célula fotovoltaica de Silício.	33
Figura 3.13 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.	34
Figura 3.14 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.	35
Figura 3.15 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica sombreada.	36
Figura 3.16 – Curvas características tensão-corrente e tensão-potência em função da radiação solar do painel fotovoltaico ET-M572190BB [56].	37
Figura 3.17 – Efeito da temperatura no painel fotovoltaico ET-M53650 [56].	38
Figura 3.18 – Tipo de eixos: (a) Um eixo vertical; (b) Um eixo polar; (c) Um eixo horizontal; (d) Dois eixos.	39
Figura 4.1 – Diagrama de blocos do sistema de monitorização dos painéis fotovoltaicos.	41
Figura 4.2 – UPS <i>TRUST PW-4130M 1300 VA</i> .	42
Figura 4.3 – Estrutura do painel solar fotovoltaico monocristalino <i>ET-M53650</i> da <i>ET Solar</i> [56].	43
Figura 4.4 – Curvas características tensão-corrente e tensão-potência em função da radiação solar do painel fotovoltaico <i>ET-M53650</i> [56].	43
Figura 4.5 – Díodo de <i>bypass</i> na caixa de ligações do painel solar fotovoltaico ET-M53650.	44
Figura 4.6 – Seguidor solar com estrutura de fixação dos painéis fotovoltaicos.	44
Figura 4.7 – Diagrama de blocos do quadro de instrumentação.	45
Figura 4.8 – Fonte de 24V CC <i>TRACO POWER TXH 120-124</i> .	46
Figura 4.9 – Fonte de 5V CC <i>TRACO POWER TIW 06-105</i> .	46
Figura 4.10 – <i>Layout</i> da placa dos fusíveis, realizado no <i>Eagle</i> .	46
Figura 4.11 – Ligações da placa de circuito impresso (PCI) de proteção.	47
Figura 4.12 – Quadro de instrumentação.	47
Figura 4.13 – Ligações à placa de aquisição de dados <i>NI6009</i> .	48
Figura 4.14 – Esquemático do circuito usado para medir tensões, realizado no <i>Eagle</i> .	48
Figura 4.15 – <i>Layout</i> do circuito usado para medir tensões, realizado no software <i>Eagle</i> .	49
Figura 4.16 – PCI utilizada para medir tensões dos painéis fotovoltaicos.	49
Figura 4.17 – Sensor de corrente de efeito Hall <i>CKSR 6-NP</i> da <i>LEM</i> .	50
Figura 4.18 – Esquema de ligação do sensor de corrente de efeito Hall <i>CKSR 6-NP</i> da <i>LEM</i> [58].	50

Figura 4.19 – PCI utilizada para medir correntes dos painéis fotovoltaicos.....	50
Figura 4.20 – Curva característica do sensor de corrente <i>CKSR 6-NP</i> .....	51
Figura 4.21 – Equipamento usado para testar sensores de corrente.....	52
Figura 4.22 – Cargas utilizadas nos painéis fotovoltaicos.....	53
Figura 4.23 – Ligação das cargas aos painéis fotovoltaicos.....	53
Figura 4.24 – Interface do sistema de monitorização.....	54
Figura 4.25 – Programa principal para monitorização das tensões e correntes.....	55
Figura 4.26 – Configuração das entradas analógicas da placa de aquisição <i>NI6009</i> .....	55
Figura 4.27 – Cálculo das tensões, correntes e potências através dos dados adquiridos pela <i>NI6009</i> .....	56
Figura 4.28 – Curva característica do sensor de corrente <i>CKSR 6-NP</i> .....	57
Figura 4.29 – Hora e data do sistema.....	58
Figura 4.30 – Telhado da Escola Profissional CIOR.....	59
Figura 4.31 – Base em cimento para fixar os painéis fotovoltaicos.....	59
Figura 4.32 – Inclínómetro usado para ajustar a inclinação dos painéis fotovoltaicos.....	60
Figura 4.33 – Gráfico que permite verificar o alinhamento dos painéis com o sul geográfico.....	60
Figura 4.34 – Painel fotovoltaico fixo (à esquerda) e painel fotovoltaico com seguidor solar (à direita).....	60
Figura 4.35 – Casa de madeira no telhado da Escola Profissional CIOR.....	61
Figura 4.36 – Caixa de derivação ligada a 230 V CA.....	61
Figura 4.37 – Instalação elétrica da casa de madeira.....	62
Figura 4.38 – Instalação das tomadas.....	62
Figura 4.39 – Página <i>web</i> .....	63
Figura 5.1 – Potência produzida pelos painéis ao longo do dia em 9 de agosto de 2011.....	66
Figura 5.2 – Potência produzida pelos painéis ao longo dos dias 26 de outubro e 15 de novembro de 2011.....	66
Figura 5.3 – Potência produzida pelos painéis ao longo do dia em 14 de agosto de 2011.....	66
Figura 5.4 – Potência produzida pelos painéis ao longo do dia em 30 de julho de 2011.....	67
Figura 5.5 – Potência produzida pelos painéis ao longo dos dias 8 de agosto e 17 de novembro de 2011.....	67
Figura 5.6 – Potência produzida pelos painéis ao longo dos dias 10 de setembro e 11 de novembro de 2011.....	68
Figura 5.7 – Potência produzida pelos painéis ao longo do dia em 16 de novembro de 2011.....	68
Figura 5.8 – Produção de energia elétrica dos painéis fotovoltaicos fixo e móvel nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro de 2011.....	73
Figura A1.1 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 28 a 31 de julho de 2011.....	88
Figura A1.2 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 1 a 4 de agosto de 2011.....	88
Figura A1.3 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 5 a 14 de agosto de 2011.....	89
Figura A1.4 – Produção dos painéis fotovoltaicos ao longo do dia, de 15 a 16 de agosto de 2011.....	90
Figura A1.5 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 1 a 8 de setembro de 2011.....	90

Figura A1.6 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 9 a 18 de setembro de 2011. ....	91
Figura A1.7 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 19 a 28 de setembro de 2011. ....	92
Figura A1.8 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 29 a 30 de setembro de 2011. ....	93
Figura A1.9 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 1 a 8 de outubro de 2011. ....	93
Figura A1.10 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 9 a 18 de outubro de 2011. ....	94
Figura A1.11 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 19 a 28 de outubro de 2011. ....	95
Figura A1.12 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 29 a 31 de outubro de 2011. ....	96
Figura A1.13 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 1 a 6 de novembro de 2011. ....	96
Figura A1.14 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 7 a 16 de novembro de 2011. ....	97
Figura A1.15 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 17 a 26 de novembro de 2011. ....	98
Figura A1.16 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 27 a 30 de novembro de 2011. ....	99

# Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Consumo de energia elétrica <i>per capita</i> no mundo no ano 2010.....	3
Tabela 1.2 – Especificações das duas maiores centrais fotovoltaicas em Portugal [18][19].....	5
Tabela 2.1 – Albedos de alguns tipos de superfícies [40].....	22
Tabela 3.1 – Rendimento das principais tecnologias de células fotovoltaicas, medidas sob o espectro global AM1.5 (1000W/m <sup>2</sup> ) a uma temperatura de 25 ° C [52]. ....	32
Tabela 3.2 – Comparação entre diferentes tipos de células fotovoltaicas [47][50][51][53]. ....	32
Tabela 4.1 – Características elétricas do painel solar fotovoltaico <i>ET-M53650</i> .....	42
Tabela 4.2 – Características físicas do painel solar fotovoltaico <i>ET-M53650</i> .....	43
Tabela 4.3 – Principais características do seguidor solar [57].....	45
Tabela 4.4 – Valores obtidos no teste do sensor de corrente <i>CKSR 6-NP</i> .....	52
Tabela 4.5 – Valores obtidos na PCI que lê as tensões.....	57
Tabela 4.6 – Custos dos equipamentos e materiais usados neste estudo. ....	63
Tabela 5.1 – Valores de potência média e de energia obtidos para os sistemas fixo e móvel referentes a alguns dias do mês de julho de 2011. ....	68
Tabela 5.2 – Valores de potência média e de energia obtidos para os sistemas fixo e móvel referentes a alguns dias do mês de agosto de 2011 (* Dia em que houve interrupção da medição). ....	69
Tabela 5.3 – Valores de potência média e de energia obtidos para os sistemas fixo e móvel referentes ao mês de setembro de 2011 (* Dia em que houve interrupção da medição).....	70
Tabela 5.4 – Valores de potência média e de energia obtidos para os sistemas fixo e móvel referentes ao mês de outubro de 2011 (* Dia em que houve interrupção da medição).....	71
Tabela 5.5 – Valores de potência média e de energia obtidos para os sistemas fixo e móvel referentes ao mês de novembro de 2011.....	72
Tabela 5.6 – Estudo da viabilidade económica para um sistema solar fotovoltaico fixo de 4,6 kW de potência (a partir de dados estimados).....	75
Tabela 5.7 – Estudo da viabilidade económica para o sistema solar fotovoltaico móvel de dois eixos de 4,6 kW de potência (a partir de dados estimados). ....	76
Tabela 5.8 – Energia produzida por mês, em kWh, por um sistema solar fotovoltaico fixo e móvel de um eixo com potência de 200 W .....	77
Tabela 5.9 – Preço da energia solar no regime bonificado [60]. ....	77
Tabela 5.10 – Estudo financeiro para um sistema fotovoltaico fixo de 200 W de potência. ....	78
Tabela 5.11 – Estudo financeiro para um sistema fotovoltaico móvel de um eixo de 200 W de potência. 78	
Tabela 5.12 – Ganhos de um sistema solar fotovoltaico móvel de 200 W em relação a um sistema fixo de 200 W no regime bonificado .....	79

## Lista de Acrónimos

AVR	<i>Auto Voltage Regulation</i>
CIOR	Centro de Investigação e Orientação (Escola Profissional)
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
ET	Equação do Tempo
GMT	<i>Greenwich Mean Time</i>
HL	Hora Legal
HLM	Hora Local Média
HSV	Hora Solar Verdadeira
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IP	Índice de Proteção
LL	Longitude Local
LS	Longitude Standard
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
PCN	Pólo Celeste Norte
PCS	Pólo Celeste Sul
REN	Rede Elétrica Nacional
RNT	Rede Nacional de Transportes
RTIEBT	Regras Técnicas de Instalações Elétricas em Baixa Tensão
TMG	Tempo Médio de Greenwich
TSM	Tempo Solar Médio
TSV	Tempo Solar Verdadeiro
TU	Tempo Universal
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>

# Nomenclatura

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Unidade</b>
$\varphi$	Latitude	°
$\lambda$	Longitude	°
$\delta_s$	Declinação Solar	°
$h_s$	Ângulo Horário Solar	
$z$	Azimute Solar	°
$\alpha$	Altura Solar	°
$I_0$	Corrente de saturação do díodo	A
$V$	Tensão aos terminais da célula fotovoltaica	V
$V_t$	Potencial térmico	V
$I_S$	Corrente da fonte	A
$P_{MPP}$	Potência máxima do painel fotovoltaico	W
$A$	Área do painel fotovoltaico	m <sup>2</sup>
$G$	Radiação solar incidente	W/m <sup>2</sup>
$R_0$	Resistência à temperatura inicial	Ω
$\alpha$	Coefficiente de temperatura	Ω/°C
$T_f$	Temperatura final	°C
$T_0$	Temperatura inicial	°C

# CAPÍTULO 1

## Introdução

### 1.1. História da Energia Solar Fotovoltaica

Pode dizer-se que a história do fotovoltaico começou em 1839, com o físico francês Edmond Becquerel que descobriu que ocorria uma diferença de potencial quando elétrodos constituídos por placas de Platina (Pt) ou de Prata (Ag), mergulhados num eletrólito, eram expostos à luz (ver Figura 1.1). A este fenómeno chama-se efeito fotovoltaico [1].

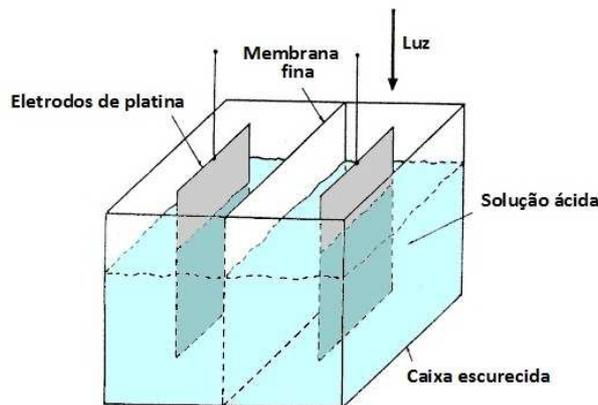


Figura 1.1 – Dispositivo fotovoltaico descrito por Edmond Becquerel [1].

Em 1873, Willoughby Smith, um engenheiro eletrotécnico inglês, descobriu a fotocondutividade do Selénio (Se) [2].

Em 1877, William Grylls Adams e Richard Evans Day descobriram que eram geradas correntes elétricas em tubos de Selénio devido à ação da luz, conforme ilustrado na Figura 1.2, e assim demonstraram o efeito fotovoltaico no estado sólido [1].

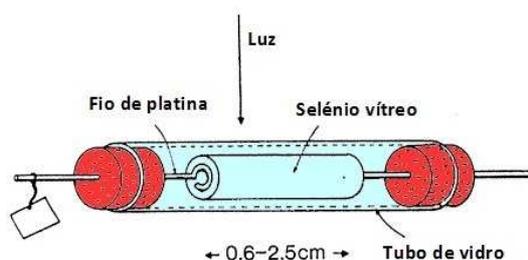


Figura 1.2 – Tubo usado por William Grylls Adams e Richard Evans Day na investigação do efeito fotovoltaico no Selénio [1].

Em 1883, Charles Fritts construiu a primeira célula solar fotovoltaica de Selênio comprimindo uma camada fina de Selênio derretido entre uma placa de metal e uma folha de Ouro (Au), com uma área de cerca de  $30 \text{ cm}^2$ , como ilustra a Figura 1.3 [1].

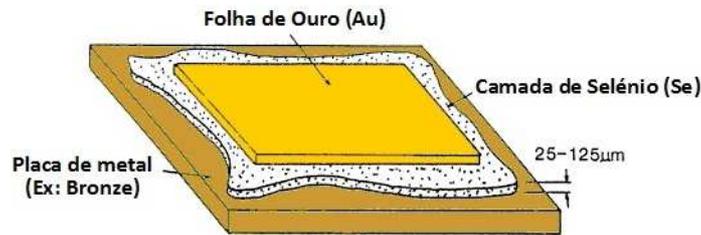


Figura 1.3 – Primeira célula solar fotovoltaica construída por Charles Fritts [1].

Daryl Chapin, Calvin Fuller, e Gerald Pearson, investigadores dos Laboratórios Bell verificaram que uma célula fotovoltaica de Silício (Si) era muito mais eficiente do que uma de Selênio e, em 1954, construíram a primeira célula fotovoltaica de Silício, com uma eficiência de 6% [3].

Ainda no ano de 1954, foram publicados resultados de uma célula fotovoltaica baseada em Sulfeto de Cobre ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) e Sulfeto de Cádmio ( $\text{CdS}$ ), com uma eficiência também de 6% [1].

Na segunda metade da década de 50 do século XX, as células fotovoltaicas de Silício tornaram-se mais eficientes chegando aos 14% de eficiência em 1960 [4].

Em 1958 foi lançado o primeiro satélite alimentado a partir de células fotovoltaicas [5]. Este satélite, de nome Vanguard I, utilizou células fotovoltaicas de Silício.

Na década de 70 do século XX, a crise do petróleo fez com que houvesse mais interesse pelas energias renováveis, nomeadamente a energia solar fotovoltaica, sendo procuradas e desenvolvidas soluções mais baratas e mais eficientes, implicando também o uso de novos materiais [6].

A partir daí as aplicações foram crescendo assim como o desenvolvimento e investigação de novos tipos de células fotovoltaicas para aumentar a eficiência e reduzir os custos dos painéis solares fotovoltaicos.

## 1.2. Produção de Energia Elétrica

As necessidades energéticas a nível mundial têm crescido imenso nas últimas décadas (ver Figura 1.4). O crescimento económico e a evolução social de alguns países têm contribuído para tal, sendo que os países mais ricos ou com climas mais inóspitos são os que mostram um consumo de energia por habitante mais elevado [7]. Pode

observar-se na Tabela 1.1 o consumo de energia elétrica *per capita* no mundo no ano de 2010, segundo dados da Agência Internacional para a Energia (*International Energy Agency - IEA*) [8]. Em 2010 o consumo de energia elétrica *per capita* em Portugal foi de 4 772,6 kWh [9].

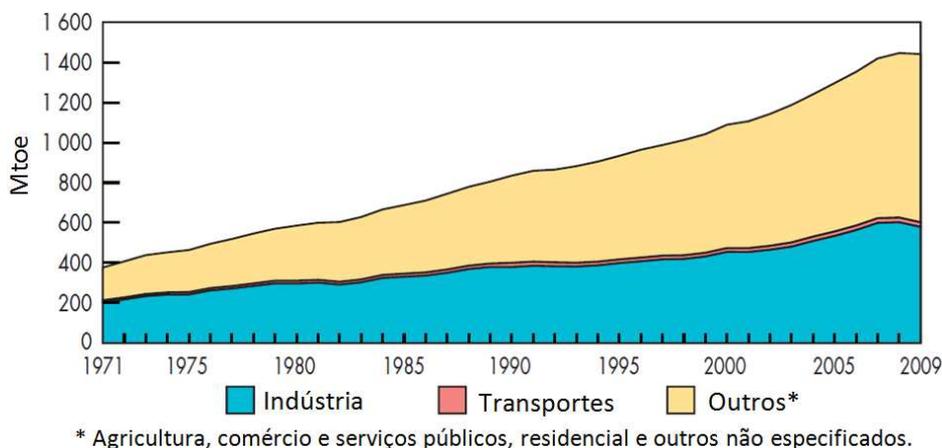


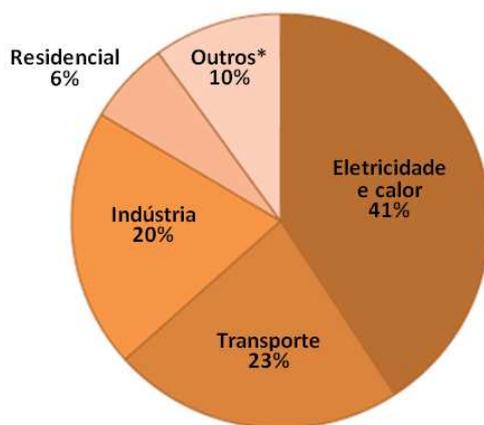
Figura 1.4 – Consumo de energia elétrica no Mundo entre os anos de 1971 e 2009 em Mtoe (Milhões de toe) [10].

A unidade toe (*tonne of oil equivalent* – tonelada equivalente de petróleo) é uma unidade de energia que corresponde à quantidade de energia queimada por uma tonelada de petróleo. A IEA define que 1 toe = 11,63 MWh.

Tabela 1.1 – Consumo de energia elétrica *per capita* no mundo no ano 2010.

<b>Consumo de Energia <i>per Capita</i> (kWh) em 2010</b>	
América do Norte	11 113
América Latina	1 956
Europa OCDE	6 287
Europa fora da OCDE	3 378
Antiga URSS	6 443
África	571
Médio Oriente	3 384
China e Hong Kong	2 471
Ásia excluindo China	719
Pacífico OCDE	8 618

A energia produzida pelas centrais termoelétricas resulta da combustão de carvão, gás, petróleo e derivados; estas centrais emitem grandes quantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para a atmosfera. Estas emissões de CO<sub>2</sub> contribuem para o agravamento do efeito de estufa, suscetível de provocar o tão discutido aquecimento global, e consequentemente as alterações climáticas [11][12][13]. Pode ver-se na Figura 1.5 que o setor em que as emissões de CO<sub>2</sub> são maiores é o da geração de eletricidade e calor.



\* Agricultura e floresta, comércio e serviços públicos, pesca, residencial, indústrias da energia que não a geração de eletricidade e calor, e outras emissões não especificadas.

Figura 1.5 – Emissões de CO<sub>2</sub> por setor no mundo em 2009 [14].

Segundo dados da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), em Portugal grande parte da energia elétrica ainda é produzida por centrais termoelétricas, no entanto no ano de 2009 a produção a partir de fontes de energia “limpas” (não poluentes) aumentou em relação a 2008, diminuindo a produção através das centrais termoelétricas [15], e essa tendência manteve-se no ano de 2010, como se pode ver na Figura 1.6.

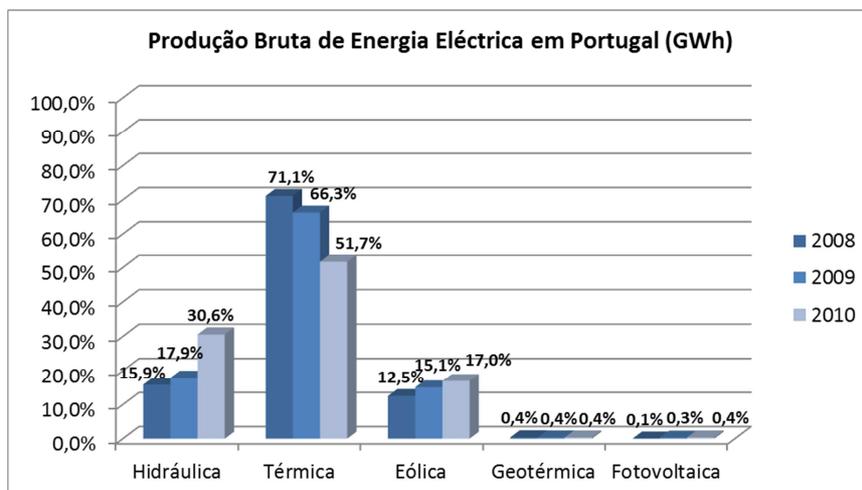


Figura 1.6 – Fontes da produção bruta de energia elétrica em Portugal nos anos de 2008 e 2009.

A utilização da energia solar fotovoltaica em Portugal começou a desenvolver-se mais significativamente a partir de 2007, como ilustra a Figura 1.7 (dados da DGEG), sendo que nesse mesmo ano entrou em funcionamento uma das maiores centrais fotovoltaicas do país (Parque Fotovoltaico Hércules). No ano de 2010 a potência instalada de energia fotovoltaica em Portugal foi de 134,3 MW (dados da DGEG), ver Figura 1.8 [16]. O apoio dado à microgeração em Portugal também tem contribuído para este aumento, sendo que no ano de 2008 a potência ligada à rede elétrica dos sistemas fotovoltaicos era de 1 797 kW, subindo para 29 707 kW em 2011 [17].

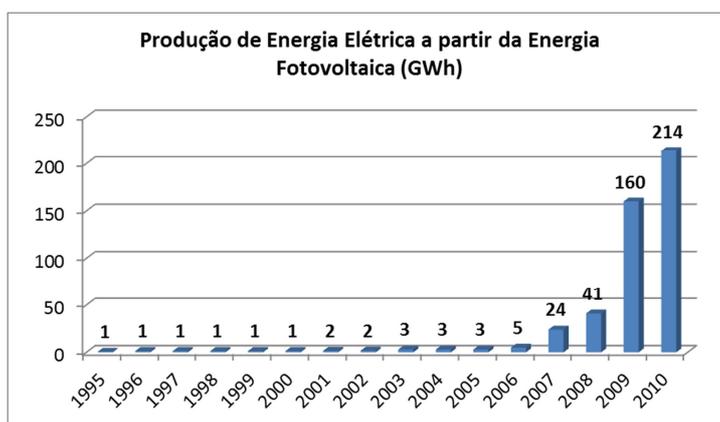


Figura 1.7 – Produção de energia elétrica a partir da energia fotovoltaica em Portugal.

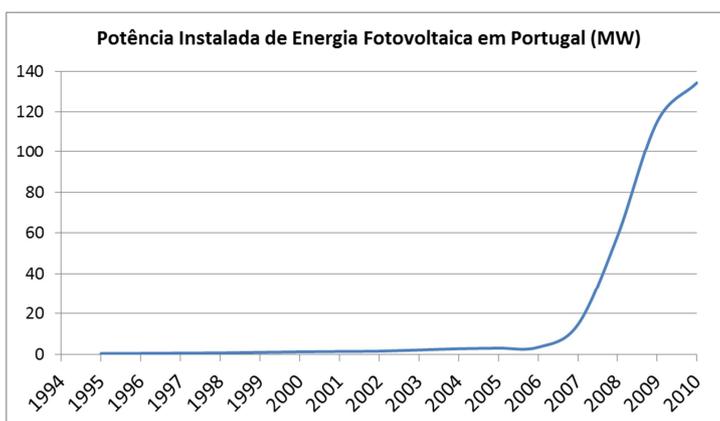


Figura 1.8 – Potência instalada de energia fotovoltaica em Portugal.

Na Tabela 1.2 podem ver-se características das duas maiores centrais fotovoltaicas existentes em Portugal, como a potência instalada, número de painéis fotovoltaicos, ano do início de funcionamento e emissões evitadas de CO<sub>2</sub> estimadas.

Tabela 1.2 – Especificações das duas maiores centrais fotovoltaicas em Portugal [18][19].

<b>Parque Fotovoltaico de Hércules</b>	
Localização	Serpa - Beja
Potência instalada	11 MWp
Nº de painéis fotovoltaicos	52 000
Ano de início de funcionamento	2007
Emissões evitadas de CO <sub>2</sub> estimadas	30 000 Toneladas por ano.
<b>Central Fotovoltaica de Amareleja (Moura)</b>	
Localização	Amareleja – Moura - Beja
Potência instalada	62 MWp
Nº de painéis fotovoltaicos	376 632
Ano de início de funcionamento	2008
Emissões Evitadas de CO <sub>2</sub> estimadas	60 000 Toneladas por ano

### 1.3. Importância da Energia Solar Fotovoltaica

As preocupações com a sustentabilidade energética do planeta consistem num outro aspeto que corrobora para a aposta nas energias renováveis, uma vez que os combustíveis fósseis (petróleo, gás e carvão), para além de serem poluentes, não são inesgotáveis. Já com relação à utilização da energia nuclear, há que considerar as suas desvantagens, tais como os acidentes nucleares (como o de Chernobil, na Ucrânia, em 1986, e o de Fukushima, no Japão, em 2011), a questão dos resíduos nucleares e a necessidade de enriquecimento do Urânio (U) [20]. Assim, a energia solar assume uma importância cada vez maior uma vez que é uma fonte inesgotável e não poluente na sua utilização, sendo pouco poluente no processo de fabrico dos painéis fotovoltaicos [20][21]. Outro aspeto a ter em conta é que é uma forma de energia que pode chegar a zonas mais isoladas, onde não há rede elétrica.

Através das Figuras 1.9 e 1.10, obtidas em Portugal num dia típico de verão, pode verificar-se que as horas de maior consumo de energia elétrica correspondem também ao período onde há maior produção de eletricidade pelas fontes de energia fotovoltaica, auxiliando deste modo a produção de energia elétrica para suprir as necessidades da rede elétrica. Por sua vez a produção de eletricidade pelas fontes de energia eólica é menor nas horas de maior consumo de energia elétrica (ver Figura 1.11). Num dia de inverno, apesar da contribuição da energia fotovoltaica não ser tão grande, e o consumo de energia elétrica ser maior, como mostrado na Figura 1.12 e na Figura 1.13, ainda assim ocorre a contribuição para a produção de energia no período de maior consumo, durante o dia, mantendo-se a importância das fontes de energia fotovoltaica. Pode ver-se que a produção de eletricidade pelas eólicas é menor nas horas de maior consumo durante o dia (ver Figura 1.14).

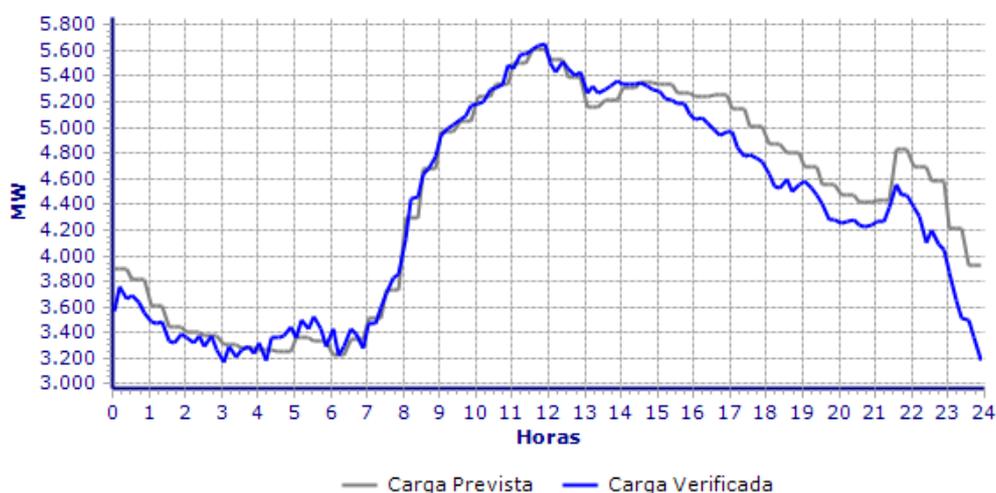


Figura 1.9 – Consumo de Potência da Rede Nacional de Transportes (RNT) em 21 de junho de 2011 [22].

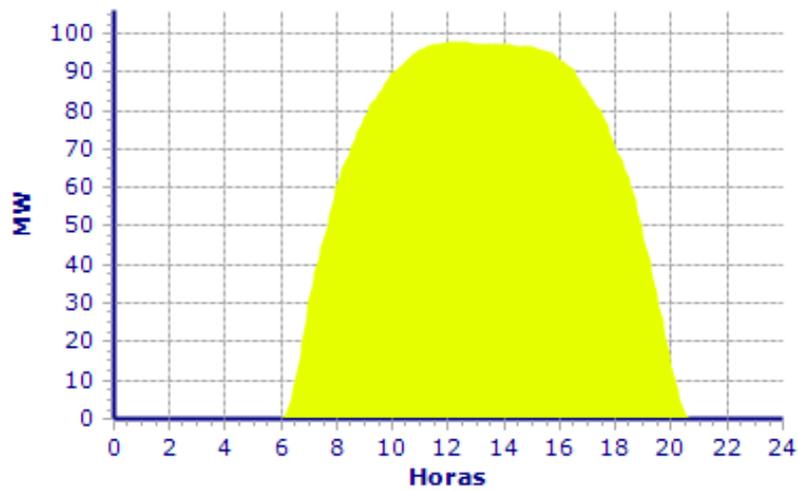


Figura 1.10 – Potência entregue à Rede Elétrica Nacional (REN) por produção fotovoltaica em 21 de junho de 2011 [23].

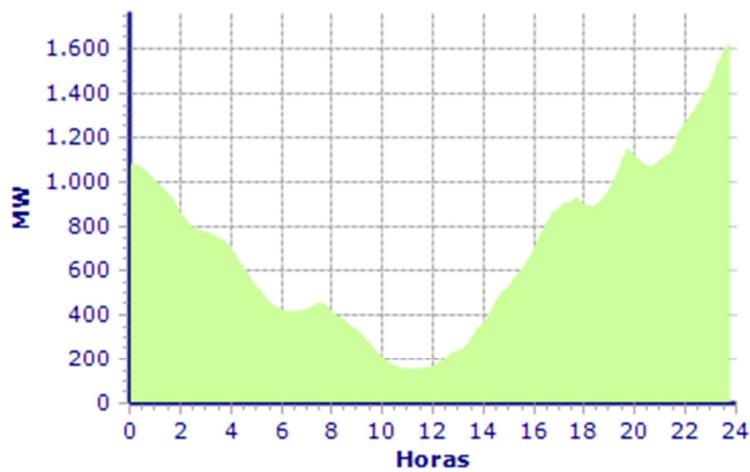


Figura 1.11 – Potência entregue à Rede Elétrica Nacional (REN) por produção eólica em 21 de junho de 2011 [23].

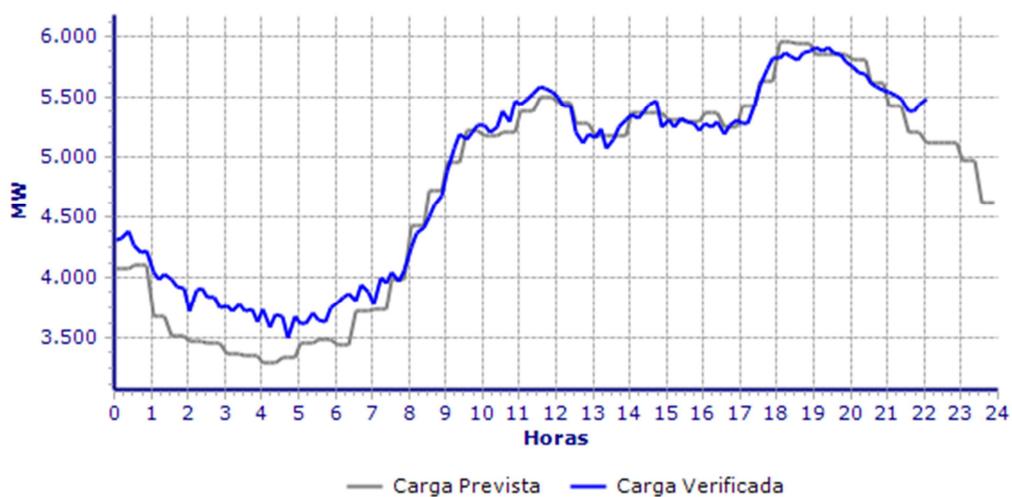


Figura 1.12 – Consumo de Potência da Rede Nacional de Transportes (RNT) em 7 de dezembro de 2011 [22].

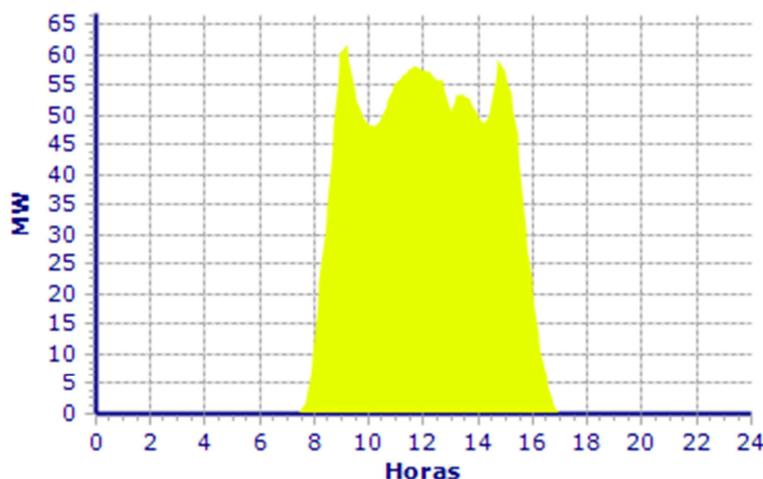


Figura 1.13 – Potência entregue à Rede Elétrica Nacional (REN) por produção fotovoltaica em 7 de dezembro de 2011 [23].

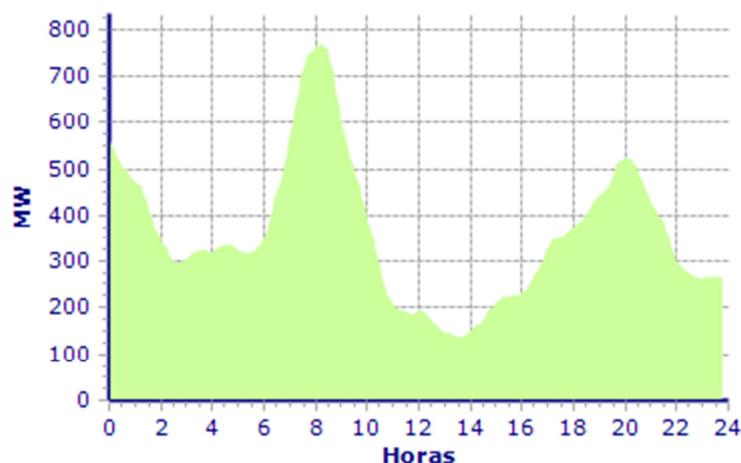


Figura 1.14 – Potência entregue à Rede Elétrica Nacional (REN) por produção eólica em 7 de dezembro de 2011 [23].

Em 2008, na Alemanha foram produzidos 4 420 GWh de energia através da energia solar fotovoltaica, enquanto em Portugal, nesse mesmo ano foram produzidos apenas 38 GWh (116 vezes menos). Em 2009, na Alemanha foram produzidos 6 579 GWh de energia através do solar fotovoltaico, enquanto em Portugal foram produzidos apenas 160 GWh (41 vezes menos) (dados da IEA). Ao observar o mapa de irradiação horizontal solar global da Europa (Figura 1.15), verifica-se que em Portugal a média anual de irradiação solar é bastante superior à da Alemanha. A irradiação solar em Portugal está por volta dos 1 600 kWh/m<sup>2</sup>. Assim, Portugal é um país onde a energia solar fotovoltaica pode ser bastante mais aproveitada, daí a importância de se investir mais neste setor.

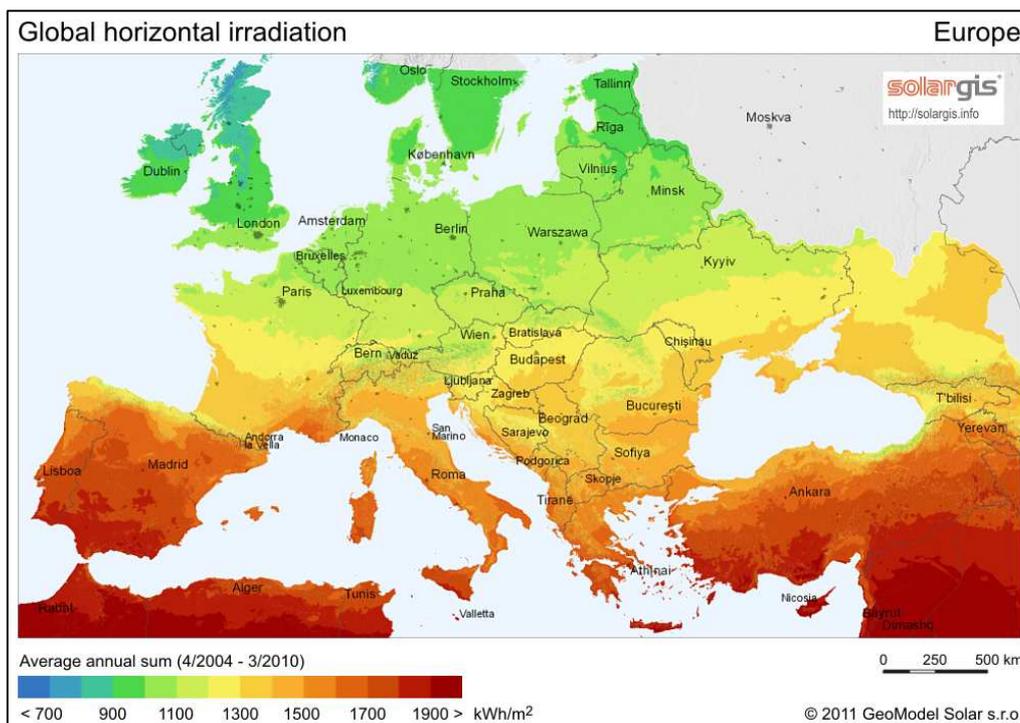


Figura 1.15 – Mapa de irradiação horizontal solar global da Europa [24].

## 1.4. Motivações

Pelas razões apontadas anteriormente, cada vez mais as energias renováveis vão desempenhar um papel primordial na produção de energia no mundo, tendo ainda um grande potencial por explorar.

Dentre as fontes de energia renovável, a energia solar fotovoltaica apresenta-se como uma das mais promissoras, porém o rendimento de aproveitamento desta fonte de energia ainda é muito baixo (os painéis solares comerciais apresentam rendimentos máximos de cerca de 20%), sendo a sua otimização necessária, tornando-a mais eficiente, e ainda reduzindo os seus custos de produção, para que a sua utilização se torne mais acessível e generalizada.

No mercado existem várias tecnologias de células fotovoltaicas, sendo umas mais eficientes do que outras, assim como existem diversas soluções para se otimizar a captação da radiação solar. Há painéis solares fotovoltaicos fixos enquanto outros são orientáveis, em um ou dois eixos. Os painéis orientáveis têm por objetivo seguir o sol de forma a aproveitar o máximo de radiação solar. Alguns fabricantes apontam que a produção de um painel solar fotovoltaico orientável com seguidor solar pode ser de 30% a 40% superior ao de um painel solar fotovoltaico fixo [25] [26]. Contudo existe um custo/benefício entre o investimento que se vai fazer num painel orientável e o aumento do seu rendimento.

## **1.5. Objetivos**

Este trabalho tem por objetivos escolher, adquirir, instrumentar, montar e testar painéis solares fotovoltaicos, de modo a fazer um estudo comparativo do rendimento entre um painel solar fotovoltaico fixo e um orientável, verificando se é ou não vantajoso adquirir um painel em vez de outro.

Este projeto foi implementado na Escola Profissional CIOR. Depois de feito o estudo, o sistema será utilizado pelos alunos dos cursos de Energias Renováveis, Eletrónica Automação e Comando e Instalações Elétricas da Escola Profissional CIOR.

## **1.6. Organização da Dissertação**

No Capítulo 2 são apresentados alguns conceitos relativos à energia solar.

No Capítulo 3 são mostradas as tecnologias existentes dos painéis fotovoltaicos e sistemas de controlo.

No Capítulo 4 descreve-se o equipamento usado neste trabalho, e a forma como foi feita a implementação. Também é apresentado o programa para aquisição de dados elaborado em *LabView*.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais obtidos através dos dados adquiridos com os painéis solares fotovoltaicos fixo e orientável, bem como a análise desses resultados.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

# CAPÍTULO 2

## Energia Solar

### 2.1. Introdução

Para o estudo da energia solar fotovoltaica é necessário perceber alguns conceitos de forma a poder utilizar o melhor possível os recursos do Sol na produção de energia elétrica. Assim neste capítulo começa-se por falar sobre os movimentos da Terra e dos seus pontos de referência mais importantes. De seguida explicam-se os sistemas de coordenadas mais utilizadas para este estudo. Explicam-se também os conceitos relativos à medida do tempo, assim como os ângulos solares. Fala-se ainda da radiação solar, e por fim de como se devem orientar os painéis solares fotovoltaicos.

### 2.2. Considerações Sobre o Movimento da Terra

A Terra efetua um movimento de rotação, isto é, roda em torno do seu eixo, num movimento de oeste para leste.

A Terra também descreve um movimento de translação à volta do Sol, numa trajetória que é elíptica, sendo a excentricidade da sua órbita igual a 0,017 \*, e onde o Sol ocupa um dos focos da elipse. A distância da Terra ao Sol varia entre 147,05 e 152,14 milhões de quilómetros, como ilustrado na Figura 2.1 [27].

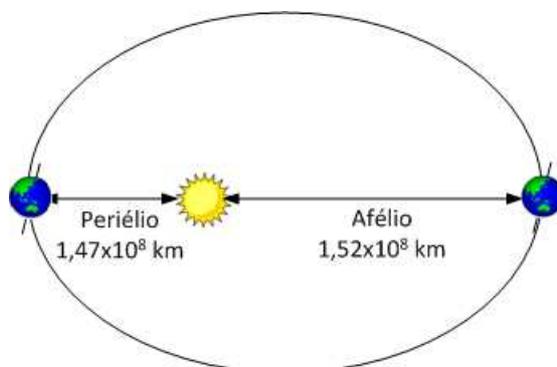


Figura 2.1 – Movimento da Terra à volta do Sol.

---

\* O valor da excentricidade de uma elipse situa-se entre 0 e 1. Pode dizer-se que uma circunferência é uma elipse de excentricidade nula.

A segunda lei de Kepler diz que “uma linha que se estenda do Sol a um planeta, orientada nesse sentido, varre áreas iguais em intervalos de tempo iguais” [27]. Assim a Terra movimenta-se mais depressa quando está mais próxima do Sol e mais devagar quando está mais afastada do Sol (ver Figura 2.2).

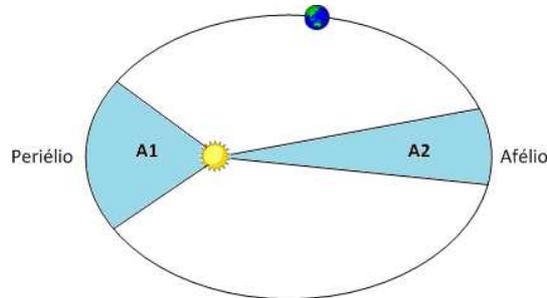


Figura 2.2 – Segunda lei de Kepler.

### 2.3. A Terra e a Esfera Celeste

Quando se observa o céu à noite em qualquer região da Terra, num local não iluminado, sem nuvens e sem luar, um observador tem a sensação de estar numa enorme esfera, que se designa normalmente de Esfera Celeste, sendo utilizada para simplificar a indicação dos astros no céu [27].

Na Figura 2.3 pode ver-se a representação da Esfera Celeste e o horizonte de um observador no hemisfério sul da Terra. A seguir são apresentadas algumas definições:

- Horizonte é o plano tangente à Terra e perpendicular à vertical do lugar onde está o observador. Sendo o raio da Terra desprezável em relação ao raio da esfera celeste, considera-se que o horizonte divide a esfera celeste em dois hemisférios, o das estrelas visíveis e o das invisíveis, naquele momento e naquele lugar.
- Zénite é o ponto perpendicular ao plano do horizonte que intercepta a esfera celeste acima do observador.
- Equador Celeste é o círculo máximo em que o prolongamento do equador da Terra intercepta a esfera celeste.
- Pólo Celeste Norte (PCN) é o ponto em que o prolongamento do eixo da Terra intercepta a esfera celeste no hemisfério norte.
- Pólo Celeste Sul (PCS) é o ponto em que o prolongamento do eixo da Terra intercepta a esfera celeste no hemisfério sul [28].

Como a terra gira de oeste para leste, o movimento aparente do Sol, assim como de planetas e estrelas, é de leste para oeste.

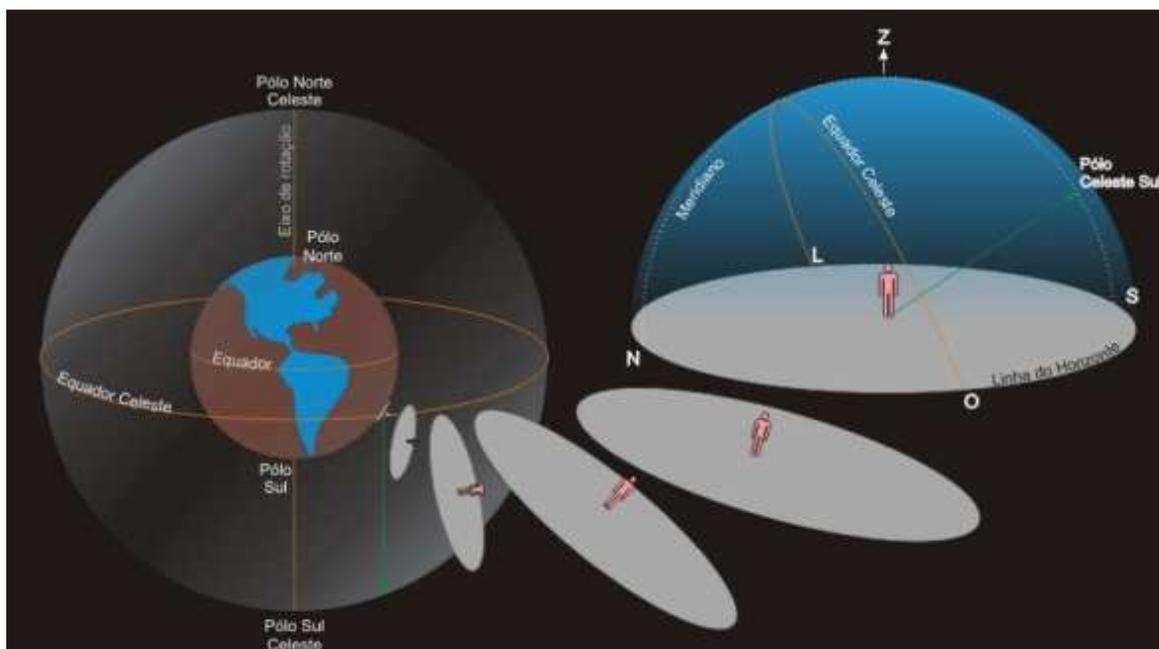


Figura 2.3 – Representação da Esfera Celeste [29].

Na Figura 2.4 pode ver-se a representação dos paralelos e dos meridianos da Terra. O equador divide a Terra em dois hemisférios, norte e sul. Os paralelos são círculos menores paralelos ao equador e perpendiculares ao eixo da Terra, e os meridianos são círculos máximos que passam pelos pólos norte e sul. Ao paralelo com latitude de  $23^{\circ} 27'$  N chama-se Trópico de Câncer, e corresponde à declinação máxima alcançada pelo Sol no hemisfério norte. Ao paralelo com latitude de  $23^{\circ} 27'$  S chama-se Trópico de Capricórnio, e corresponde à declinação máxima alcançada pelo Sol no hemisfério sul [30].

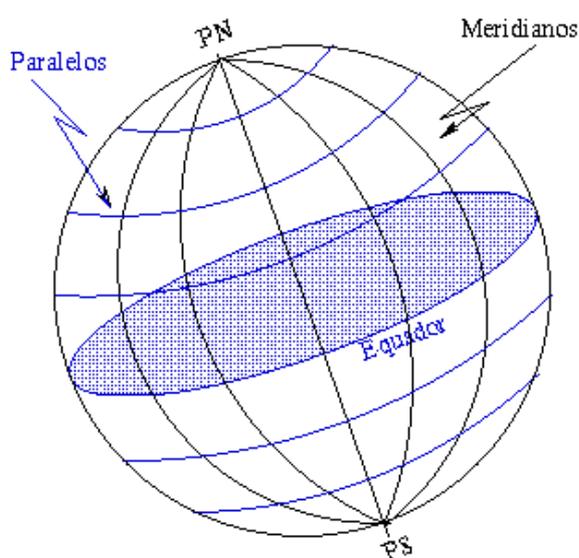


Figura 2.4 – Representação dos paralelos (a azul) e dos meridianos (a preto) da Terra [29].

## 2.4. Coordenadas Geográficas e Astronómicas

Para o estudo da energia solar tem de se conhecer o sistema de coordenadas geográficas e o sistema de coordenadas astronómicas.

### 2.4.1. Coordenadas Geográficas: Latitude e Longitude

A posição na Terra tem como planos fundamentais de referência o equador e o meridiano de Greenwich.

A latitude, representada por  $\varphi$ , pode definir-se como sendo a distância angular ao equador medida ao longo do meridiano, como mostrado na Figura 2.5. Esta distância é medida em graus e varia entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  para norte ou para sul [31]. Como por exemplo, a latitude da Escola Profissional CIOR é de  $41^\circ 23' 59''$  N (coordenadas obtidas através do software *Google Earth*). Para norte do equador as coordenadas são positivas e para sul são negativas.

Por sua vez a longitude, representada por  $\lambda$ , define-se como a distância angular ao meridiano de Greenwich medida ao longo do equador, conforme ilustrado na Figura 2.5. Esta distância é medida em graus, podendo variar entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$  para leste ou para oeste [31]. A longitude da Escola Profissional CIOR é de  $8^\circ 31' 21''$  W. Para leste do meridiano de Greenwich as coordenadas são positivas e para oeste são negativas.

No equador a latitude é de  $0^\circ$ , assim como a longitude no meridiano de Greenwich é de  $0^\circ$ . Nas coordenadas geográficas primeiro dá-se a latitude e depois a longitude.

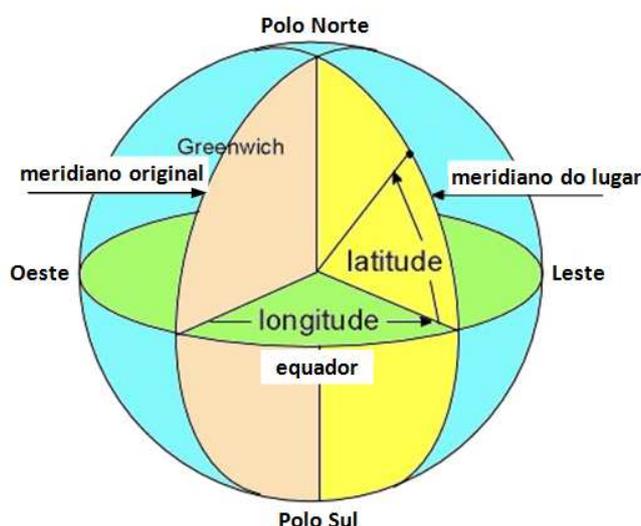


Figura 2.5 – Latitude e longitude [32].

Para facilitar os cálculos convertem-se as coordenadas geográficas em graus decimais a partir da equação (2.1).

$$\text{Graus decimais} = \text{graus} + \frac{\text{minutos}}{60} + \frac{\text{segundos}}{3600} \quad (2.1)$$

Tomando como exemplo as coordenadas geográficas da CIOR tem-se que:

$$\text{Latitude em Graus decimais} = 41 + \frac{23}{60} + \frac{59}{3600} = 41,3997^\circ$$

$$\text{Longitude em Graus decimais} = 8 + \frac{31}{60} + \frac{21}{3600} = 8,5225^\circ$$

#### 2.4.2. Coordenadas Astronómicas

Nas coordenadas astronómicas existe o sistema equatorial celeste, o sistema equatorial local e o sistema horizontal. O plano fundamental do sistema equatorial celeste e do sistema equatorial local é o equador celeste. O sistema horizontal tem como referência o horizonte celeste e as suas coordenadas são o azimute e a altura solar [28]. Neste estudo apenas irá ser visto o sistema horizontal.

### 2.5. Unidades de Medida de Tempo

Para medição do tempo tem-se o tempo sideral e o tempo solar, que se baseiam ambos no movimento de rotação da Terra. O tempo sideral baseia-se no movimento aparente das estrelas fixas, enquanto o tempo solar baseia-se no movimento aparente do Sol (toma-se como referência a Terra e o Sol gira à volta desta). Nesta secção apenas será explicado o tempo solar.

#### 2.5.1. Tempo Solar

As duas unidades fundamentais para medir o tempo solar são o dia e o ano. O dia solar é definido com o intervalo de tempo entre duas passagens do Sol pelo meridiano do lugar.

Um ano é o tempo que a Terra demora a dar uma volta completa em torno do Sol. Um ano solar tem a duração de 365 dias, 5 horas, 48 minutos e 45,97 segundos [30].

Existem vários tipos de tempo solar, como o tempo solar verdadeiro, o tempo solar médio, o tempo civil e o tempo universal [28].

O tempo solar verdadeiro (TSV) usa como referência o Sol verdadeiro, que se move ao longo da elíptica e é medido através da observação do Sol. Torna-se difícil medir o tempo usando exatamente o Sol, pois devido à órbita elíptica da Terra à volta do Sol, a velocidade do Sol verdadeiro, no seu movimento aparente através do céu, não é constante, conforme foi explicado pela segunda lei de Kepler. A duração do dia solar verdadeiro varia ao longo do ano [30].

Desta forma usa-se o tempo solar médio (TSM), que usa como referência o Sol médio. O Sol médio é um Sol fictício, que se move ao longo do equador celeste, num movimento uniforme. O dia solar médio tem sempre a duração de 24 horas. A cada hora média corresponde 15 ° de longitude, pois o Sol médio completa uma volta completa em 24 horas [30].

Como um ano solar tem a duração de 365,2422 dias solares médios, foi criado um ano civil comum, que tem 365 dias solares médios, e a cada quatro anos há um ano civil bissexto, que tem 366 dias solares médios.

O tempo universal (TU) toma como referência a hora média local, tempo solar médio, do meridiano de Greenwich.

### 2.5.2. Fusos Horários

Na Figura 2.6 pode ver-se que a Terra foi dividida em 24 setores chamados de fusos horários. Cada fuso horário abrange uma hora e cada hora equivale a 15° de longitude. O fuso horário zero tem como meridiano central o meridiano de Greenwich ( $\lambda = 0^\circ$ ), e serve de referência de tempo para os restantes, sendo chamado de TMG (tempo médio de Greenwich) ou GMT (Greenwich mean time).

A hora legal (HL) é dada pela hora média em cada um dos fusos relativa ao meridiano central do fuso. A leste de Greenwich será sempre mais tarde e a oeste será sempre mais cedo do que a hora média de Greenwich [30].

Todos os locais que utilizam o mesmo fuso horário têm a mesma hora legal.

A hora local média (HLM) varia consoante a longitude.

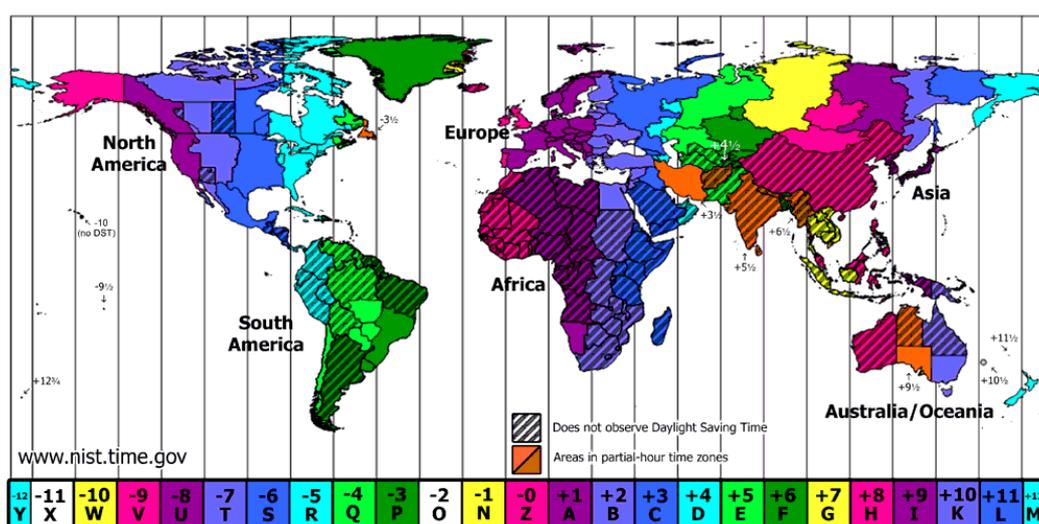


Figura 2.6 – Fusos horários [33].

### 2.5.3. Equação do Tempo

A equação do tempo (ET) é definida como sendo a diferença entre o tempo solar verdadeiro e tempo solar médio, e pode ser obtida aproximadamente através da equação (2.2) [34].

$$ET = 9,87 \text{ sen}(2B) - 7,53 \text{ cos}(B) - 1,5 \text{ sen}(B) \text{ (minutos)} \quad (2.2)$$

Onde  $B$  é dado por (2.3) [34]:

$$B = (N - 81) \frac{360}{364} \text{ (graus)} \quad (2.3)$$

Onde  $N$  é o número de dias desde o início do ano.

Na Figura 2.7 pode ver-se a curva da equação do tempo. A parte positiva representa o adiantamento do tempo solar verdadeiro sobre o tempo solar médio, o que significa que a Terra tem a rotação mais rápida, e a parte negativa representa o atraso do tempo solar verdadeiro sobre o tempo solar médio [34].

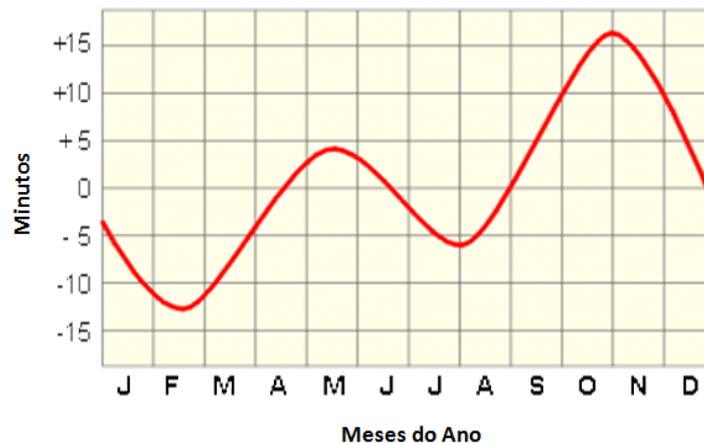


Figura 2.7 – Equação do tempo (ET): adiantamento ou atraso (em minutos) do tempo solar verdadeiro em relação ao tempo solar médio, ao longo dos meses do ano [35].

### 2.5.4. Conversão do Tempo

Para obter a hora solar verdadeira (HSV) tem de se converter primeiro a hora legal (HL) para a hora local média (HLM), fazendo uma correção da longitude, e depois converter a HLM para a HSV usando a equação do tempo.

Em (2.4) faz-se a conversão da hora legal para a hora local média, onde LL e LS são positivos ou negativos, a leste de Greenwich é positivo e a oeste de Greenwich é negativo [34]. O fator 4 aparece pelo facto da Terra rodar 1° a cada 4 minutos.

$$HLM = HL + 4 (LL - LS) \quad (2.4)$$

Sendo:

LS – Longitude standard do meridiano (longitude do meridiano central do fuso horário)

LL – Longitude local

$$HSV = HLM + ET \quad (2.5)$$

No horário de verão os relógios são adiantados de 1 hora, logo para calcular a hora solar verdadeira (HSV) nesse período, que vai de fim de março a fim de outubro, deve-se subtrair uma hora.

Mostra-se como se faz a conversão do tempo usando o seguinte exemplo:

Sendo a hora legal em Vila Nova de Famalicão de 12h30, Calcule a hora solar verdadeira para os dias 1 de fevereiro e 1 de julho, sabendo que a longitude,  $\lambda = 8,5^\circ$  O; e que  $LS = 0^\circ$ .

Para o dia 1 de fevereiro:

$$HLM = 12h30 \text{ min} \pm 4(0 - 8,5) = 12h30 \text{ min} + (-34 \text{ min}) = 11h56 \text{ min}$$

$$HSV = 11h56 \text{ min} + ET$$

$$ET \cong -14 \text{ min}$$

$$HSV = 11h56 \text{ min} - 14 \text{ min} \Leftrightarrow HSV = 11h42 \text{ min}$$

Para o dia 1 de julho:

$$HLM = 12h30 \text{ min} \pm 4(0 - 8,5) = 12h30 \text{ min} + (-34 \text{ min}) = 11h56 \text{ min}$$

$$HSV = 11h56 \text{ min} + ET$$

$$ET \cong -4 \text{ min}$$

$$HSV = 11h56 \text{ min} - 4 \text{ min} - 1h00 \Leftrightarrow HSV = 10h52 \text{ min}$$

## 2.6. Ângulos Solares

Os ângulos solares servem para saber qual a posição do Sol no céu, como a declinação solar, o azimute solar e a altura solar.

### 2.6.1. Declinação Solar

Pode definir-se declinação solar ( $\delta_s$ ) como sendo o ângulo entre o plano do equador da Terra e uma linha reta definida entre o centro do Sol e o centro da Terra (ver Figura 2.8). Este ângulo varia ao longo do ano. No hemisfério norte a declinação

máxima é de  $23,45^\circ$  e ocorre no solstício de verão, e a declinação mínima é de  $-23,45^\circ$  ocorrendo no solstício de inverno. Nos equinócios da primavera e do outono a declinação solar é nula, o que significa que os dias têm uma duração igual às noites (ver Figura 2.9). A equação (2.6) permite determinar o valor da declinação solar (num dado dia do mês), sendo que este valor varia ligeiramente de ano para ano, pois como já foi referido o ano solar tem um pouco mais de 365 dias [36].

$$\text{sen } \delta = \text{sen } 23,45^\circ \text{ sen } \left[ \frac{360}{365} (284 + N) \right] \text{ (graus)} \quad (2.6)$$

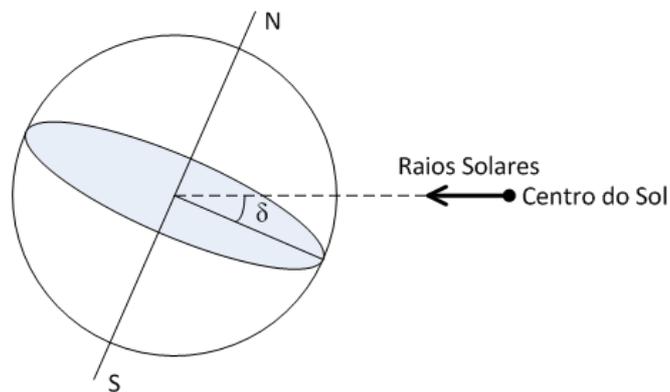


Figura 2.8 – Representação da declinação solar ( $\delta_s$ ).

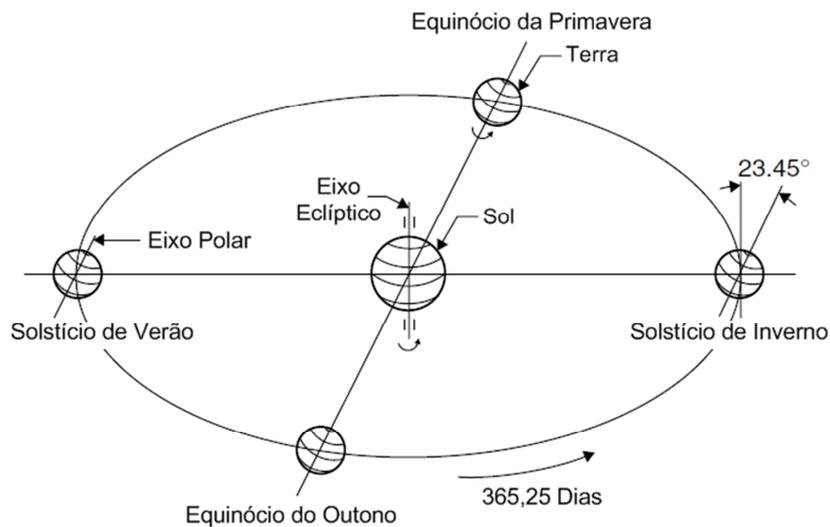


Figura 2.9 – Representação dos equinócios e solstícios no hemisfério norte [34].

### 2.6.2. Ângulo Horário Solar

O ângulo horário solar ( $h_s$ ) transforma o tempo solar verdadeiro em graus, conforme a equação (2.7). O ângulo horário solar é de  $0^\circ$  ao meio-dia solar. De manhã, este ângulo será negativo e de tarde será positivo [34].

$$h_s = 15^\circ (\text{HSV} - 12) \quad (2.7)$$

### 2.6.3. Azimute Solar

Define-se o azimute solar ( $z$ ) como sendo o ângulo medido sobre o plano do horizonte entre o sul e a vertical do Sol para o hemisfério norte, ou sobre o plano do horizonte entre o norte e a vertical do Sol para o hemisfério sul, no sentido horário (norte, leste; sul, oeste - NLSO), como ilustrado na Figura 2.10 [34]. Este ângulo define a direção do movimento do Sol, ou seja define a direção do Sol em relação aos pontos cardeais do local. Normalmente, em astronomia, o azimute de um astro é medido a partir do norte, no sentido horário (de 0 a 360 graus).

$$\text{sen}(z) = \frac{\cos(\delta) \sin(h)}{\cos(\alpha)} \quad (2.8)$$

### 2.6.4. Altura Solar

A altura solar ( $\alpha$ ) é definida como sendo o ângulo entre os raios solares e a sua projeção no plano do horizonte (ver Figura 2.10 e Figura 2.11).

Ao meio-dia solar, no hemisfério norte, o observador vai ver o Sol a sul, e no hemisfério sul o observador vai ver o Sol a norte.

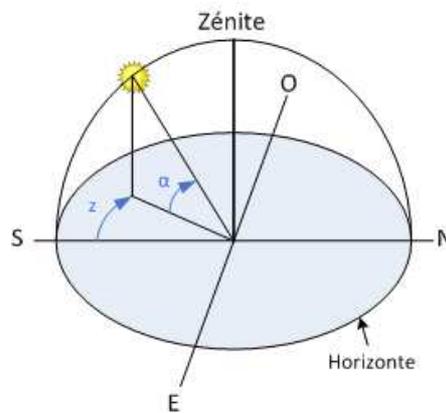


Figura 2.10 – Representação do azimute ( $z$ ) e da altura solar no hemisfério norte.

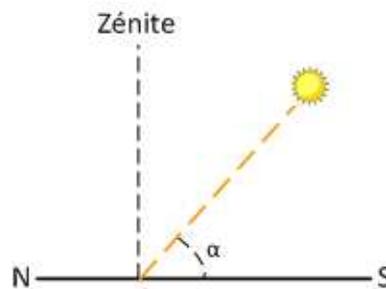


Figura 2.11 – Altura do Sol ao meio-dia solar no hemisfério norte.

A altura do Sol ao meio-dia solar (na altura máxima do Sol) pode ser calculada a partir da equação (2.9).

$$\alpha = 90 - \varphi + \delta \quad \text{No hemisfério norte} \quad (2.9)$$

$$\alpha = 90 + \varphi - \delta \quad \text{No hemisfério sul}$$

Para calcular a altura solar para qualquer hora do dia usa-se a equação (2.10) [34].

$$\text{sen } \alpha = \text{sen } (\varphi) \text{ sen}(\delta) + \text{cos } (\varphi) \text{ cos}(\delta) \text{ cos}(h) \quad (2.10)$$

Sendo:

$\varphi$  – Latitude Local

$\delta$  - Declinação solar

$h_s$  – ângulo horário solar

A altura do Sol vai ser máxima no solstício de verão e mínima no solstício de inverno (ver Figura 2.12).

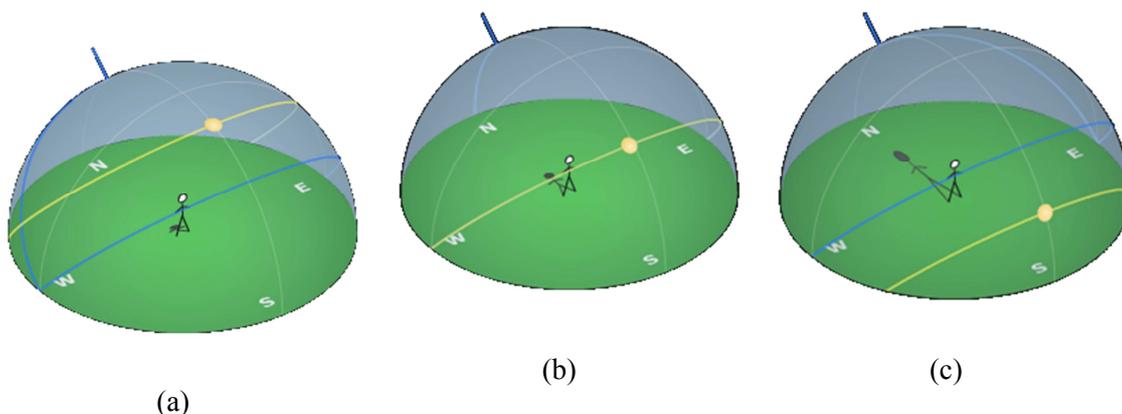


Figura 2.12 – Altura solar no hemisfério norte: (a) No solstício de verão; (b) Nos equinócios; (c) No solstício de inverno [37].

A altura solar em Vila Nova de Famalicão ( $\varphi = 41,4^\circ$ ) é de  $71,7^\circ$  no solstício de verão, e de  $25,1^\circ$  no solstício de inverno enquanto em Portimão ( $\varphi = 37,1^\circ$ ) a altura solar é de  $76,3^\circ$  no solstício de verão e de  $29,5^\circ$  no solstício de inverno. Quanto menor for a latitude maior vai ser a altura solar.

Pode obter-se o gráfico da variação da altura solar ao longo do dia para um determinado local através de um programa disponível no sítio do Laboratório de Monitorização de Energia Solar da Universidade de Oregon.

## 2.7. Radiação Solar

A intensidade da radiação solar fora da atmosfera depende da distância entre o Sol e a Terra. Como já foi referido esta distância varia durante o ano, implicando que a irradiância, ou potência da radiação solar, varie entre  $1\,325\text{ W/m}^2$  e  $1\,412\text{ W/m}^2$ , sendo em média igual a  $1\,367\text{ W/m}^2$ . Contudo, apenas uma parte desta radiação solar atinge a superfície da Terra, pois esta é reduzida através da atmosfera pela reflexão, absorção e

dispersão. Com o céu limpo, independentemente da localização, e com os raios solares perpendiculares à superfície terrestre, a irradiância é de aproximadamente  $1\ 000\ \text{W/m}^2$ , sendo chamada de radiação solar global [38].

### 2.7.1. Radiação Global, Direta, Difusa e Refletida

A radiação solar recebida na superfície terrestre designa-se por radiação solar global (ou incidente). A radiação solar global é o somatório das radiações direta, difusa e refletida (ver Figura 2.13). A radiação direta é a radiação que incide diretamente na superfície da Terra. A radiação difusa é a radiação que não atinge diretamente a superfície terrestre. A radiação refletida é a radiação refletida pelo meio que a rodeia, sendo que cada superfície possui um diferente albedo [35]. Pode definir-se albedo como sendo a razão entre a quantidade de radiação refletida pela quantidade de radiação recebida, variando entre 0 e 1 [39]. Na Tabela 2.1 podem ver-se os albedos de alguns tipos de superfícies.

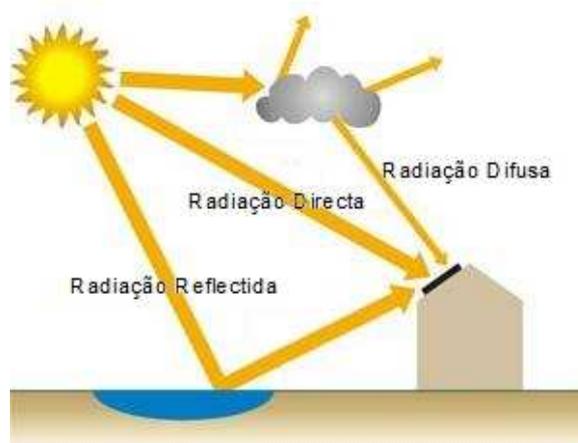


Figura 2.13 – Radiação direta, refletida e difusa [35].

Tabela 2.1 – Albedos de alguns tipos de superfícies [40].

Superfície	Albedo %
Água	5-10
Deserto	25-30
Neve fresca	80-90
Neve antiga	45-70
Floresta verde	5-10
Folhas verdes	5-25
Nuvens (média)	50-55
Nuvens com espessura < 150 m	25-63
Nuvens com 150-300 m de espessura	45-75
Nuvens com 300-600 m de espessura	59-84
Gelo marítimo	30-40
Estrada de asfalto	5-10

### 2.7.2. Massa de Ar

A massa de ar ( $AM$ ) da atmosfera terrestre tem influência na radiação solar recebida na superfície da Terra, pois dependendo da altura do Sol a massa de ar a ser atravessada é maior ou menor, fazendo com que essa radiação solar seja maior ou menor. Podemos ver pela Figura 2.14 que quando a posição do Sol é perpendicular à superfície terrestre a massa de ar a ser atravessada é menor, logo a irradiância será maior. Caso contrário a massa de ar a ser atravessada é maior, o que implica por sua vez uma irradiância menor. Aquando do seu percurso pela atmosfera a irradiância é reduzida por diversos fatores, como por exemplo a reflexão atmosférica, a absorção por moléculas da atmosfera (ozono, vapor de água, dióxido de carbono, oxigénio), a poluição, entre outros [38].

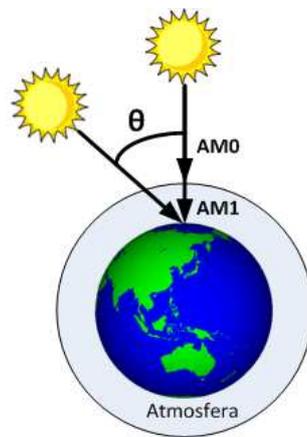


Figura 2.14 – Efeito da massa de ar na radiação solar recebida na superfície da Terra.

O valor da massa de ar pode ser calculado através da expressão dada em (2.11) [7]:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.11)$$

Quando os raios solares são perpendiculares à superfície terrestre, a massa de ar será de 1 ( $AM1$ ). A massa de ar de zero ( $AM0$ ) designa a radiação solar no espaço que não é afetada pela atmosfera. Na Europa utiliza-se uma Massa de Ar de 1,5 ( $AM1,5$ ) a que corresponde uma potência solar de cerca de  $1\,000\text{ W/m}^2$  [38][41].

### 2.7.3. Medição da Radiação Solar

Existem vários aparelhos que medem a irradiância, que se designam genericamente por radiómetros, tendo um nome mais específico dependendo da região espectral que vão medir [42]:

- Piranómetro: mede a radiação solar global, direta e difusa, sobre uma superfície plana.
- Pireliómetro: mede a radiação solar direta em incidência normal.

## 2.8. Orientação dos Painéis Fotovoltaicos

Como já foi referido, ao meio-dia solar, um observador no hemisfério norte vê o Sol a sul e no hemisfério sul vê o Sol a norte. Deste modo, no hemisfério norte deve orientar-se os painéis solares fotovoltaicos para sul, e no hemisfério sul deve orientar-se os painéis para norte.

Para determinar o sul geográfico, pode usar-se uma haste na vertical. Quando a sombra projetada tiver o menor comprimento encontrou-se o sul geográfico. Este processo é válido para um dia de sol com o céu limpo. Também se pode determinar a que hora ocorre o meio-dia solar e nessa hora a sombra indica o sul geográfico. Outra maneira é utilizar uma bússola corrigindo a declinação magnética, que é cerca de 4° W para Portugal Continental (ver Figura 2.15) [43].

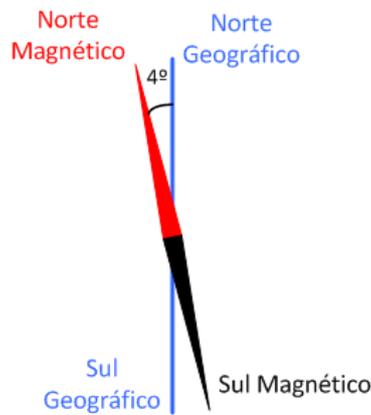


Figura 2.15 – Ângulo indicado para a inclinação dos painéis fotovoltaicos ( $\beta$ ).

A inclinação dos painéis solares fotovoltaicos ( $\beta$ ) deve ser feita de maneira a que o Sol incida na perpendicular (ver Figura 2.16). Essa inclinação varia em função da altura solar e pode ser calculada através de (2.12):

$$\beta = 180^\circ - 90^\circ - \alpha \Rightarrow \beta = 90^\circ - \alpha \quad (2.12)$$

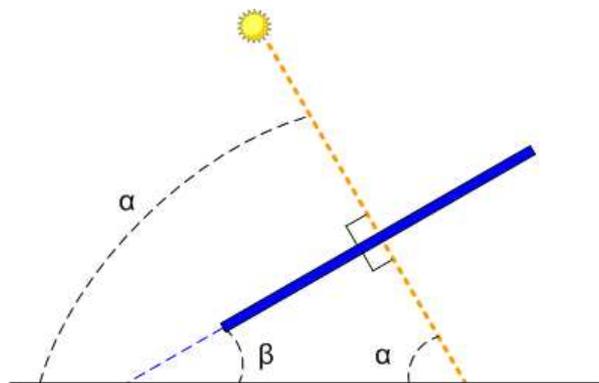


Figura 2.16 – Ângulo indicado para a inclinação dos painéis fotovoltaicos ( $\beta$ ).

Como a altura solar varia ao longo do dia e ao longo do ano, tem de se calcular a inclinação média. Para o cálculo considera-se o valor da altura do Sol ao meio-dia solar.

## **2.9. Conclusões**

Neste capítulo foram apresentados conceitos e explicados parâmetros a ter em conta para uma correta instalação dos painéis solares fotovoltaicos, de forma a se otimizar a sua utilização. Foram ainda explicados os tipos de radiação solar que chegam à superfície da Terra e da influência da massa de ar nos mesmos e apresentados os aparelhos que medem a radiação solar. Por fim mostrou-se como se devem orientar os painéis solares fotovoltaicos.

# CAPÍTULO 3

## Sistemas Solares Fotovoltaicos

### 3.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os tipos de sistemas solares fotovoltaicos, os equipamentos normalmente usados nos mesmos, e os sistemas de seguimento do Sol. Pretende-se também ter uma visão geral do tipo de células fotovoltaicas, mas não enumerar e explicar todos os tipos de células fotovoltaicas existentes no mercado ou em fase de investigação e testes em laboratórios.

### 3.2. Sistemas Solares Fotovoltaicos

Um sistema solar fotovoltaico gera energia elétrica a partir de painéis solares fotovoltaicos, embora possa ser combinado com outras fontes de energia, no caso de sistemas híbridos. A Figura 3.1 esquematiza vários tipos de sistemas solares fotovoltaicos.

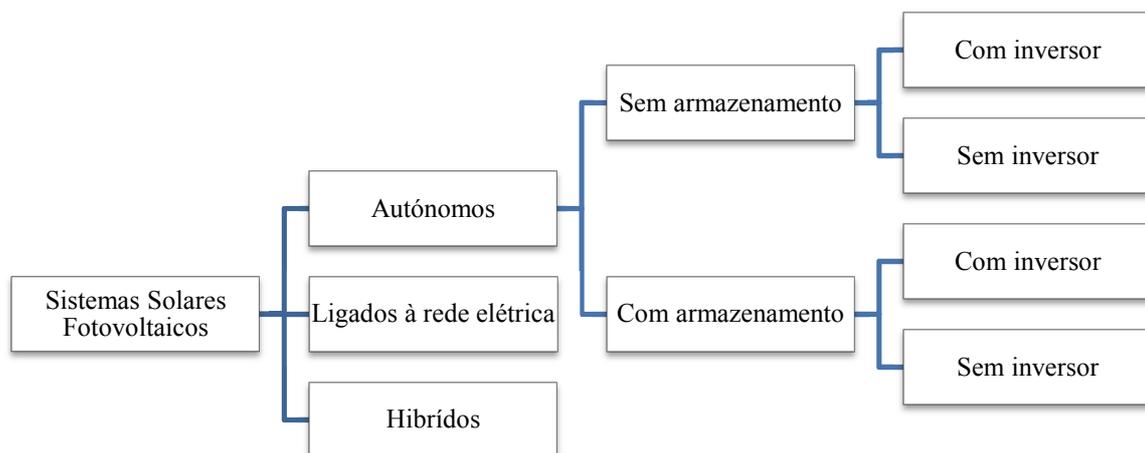


Figura 3.1 – Tipos de sistemas solares fotovoltaicos.

#### 3.2.1. Sistema Solar Fotovoltaico Autónomo

Um sistema solar fotovoltaico autónomo é usado em locais onde não há rede elétrica, o que não impede a sua utilização onde há acesso à mesma, nomeadamente em sistemas de iluminação e sinalização. São várias as aplicações deste tipo de sistema,

podendo ser utilizado em aldeias isoladas, na agricultura e pecuária como por exemplo na bombagem de água, nos sistemas de irrigação, nas cercas elétricas, na alimentação de eletrodomésticos, entre outros. Este sistema pode ser constituído pelos seguintes equipamentos (ver Figura 3.2):

- Painéis solares fotovoltaicos;
- Circuito MPPT (*Maximum Power Point Tracker*): circuito responsável por extrair a máxima potência dos painéis solares fotovoltaicos a cada instante;
- Regulador de cargas das baterias: quando são usadas baterias para armazenar a energia;
- Baterias: quando o sistema necessita de armazenamento de energia.
- Inversor: necessário quando há cargas alimentadas em corrente alternada;

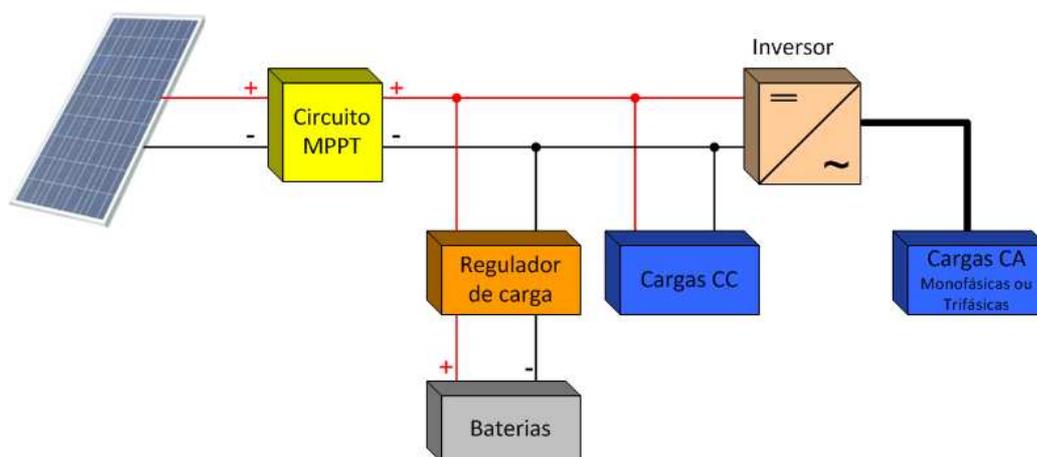


Figura 3.2 – Estrutura geral de um sistema fotovoltaico autónomo.

### 3.2.2. Sistema Solar Fotovoltaico Ligado à Rede Elétrica

Um sistema solar fotovoltaico ligado à rede elétrica permite entregar o excedente ou a totalidade da energia produzida pelos painéis fotovoltaicos à rede. Os sistemas fotovoltaicos ligados à rede podem constituir grandes parques fotovoltaicos, de até muitos milhares de kW, mas podem também ser de apenas alguns kW, utilizados em habitações ou edifícios públicos. Habitualmente os sistemas ligados à rede elétrica necessitam de menos manutenção do que os sistemas autónomos, por não utilizarem baterias e o regulador de carga das baterias. Um sistema fotovoltaico ligado à rede elétrica tem normalmente os seguintes equipamentos (ver Figura 3.3):

- Painéis solares fotovoltaicos;
- Circuito MPPT;
- Inversor.

- Contador de energia elétrica de consumo e de venda. Estes dois podem ser apenas um contador bidirecional.

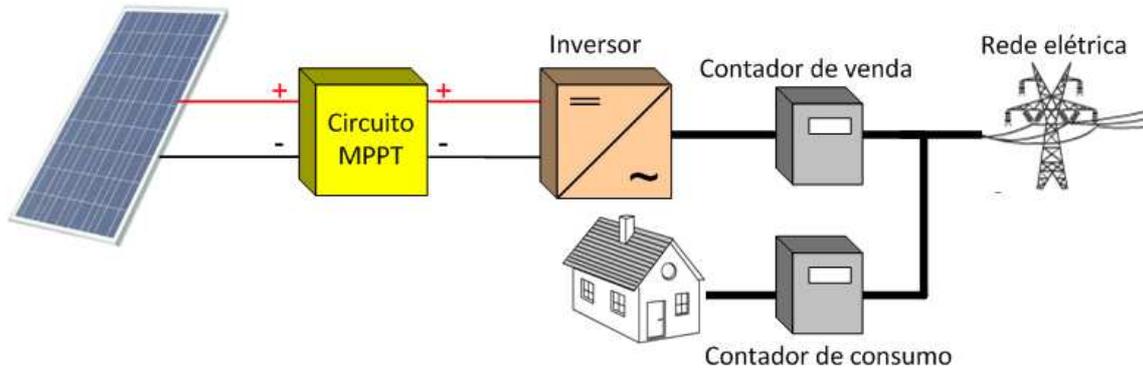


Figura 3.3 – Estrutura geral de um sistema fotovoltaico ligado à rede elétrica.

### 3.2.3. Sistema Solar Fotovoltaico Híbrido

Um sistema solar fotovoltaico híbrido consiste na associação de sistemas fotovoltaicos com outra fonte de energia, como por exemplo, eólica, hídrica, ou gerador a diesel (ver Figura 3.4).

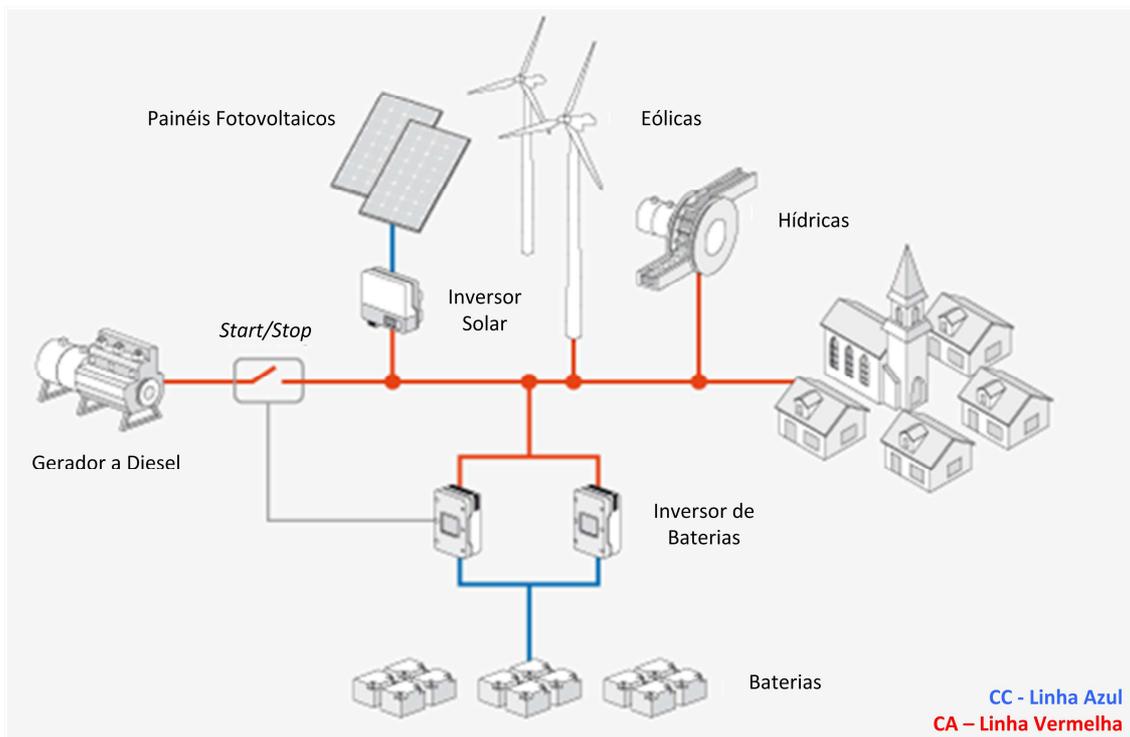


Figura 3.4 – Estrutura geral de um sistema fotovoltaico híbrido ligado à rede elétrica [44].

### 3.2.4. Tipos de Equipamentos Utilizados nos Sistema Solares Fotovoltaicos

A seguir são apresentados os principais tipos de equipamentos utilizados em sistemas solares fotovoltaicos.

**Circuito MPPT:** O MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) é o circuito responsável por garantir a extração da máxima potência disponível nos painéis solares fotovoltaicos a cada instante. Pode ser utilizado tanto nos sistemas fotovoltaicos autónomos como nos sistemas ligados à rede elétrica.

**Regulador de Carga de Baterias:** É usado nos sistemas fotovoltaicos autónomos, sendo colocado entre os painéis solares fotovoltaicos e as baterias, e tem como finalidade controlar a carga das baterias de forma a evitar que estas sejam danificadas ou que a sua vida útil seja reduzida. A função de um regulador de carga consiste em parar de carregar uma bateria quando a tensão desta atinge um nível máximo admissível, e ainda impedir que a mesma descarregue demasiadamente. Na Figura 3.5 pode ver-se um regulador de carga de baterias para painéis solares fotovoltaicos de 12 V/24 V.



Figura 3.5 – Regulador de carga solar *Steca PR3030* com LCD 12/24V 30A [45].

**Inversor:** É usado nos sistemas fotovoltaicos ligados à rede elétrica, podendo também ser usado nos sistemas autónomos, e tem como função fazer conversão de corrente contínua em corrente alternada. Na Figura 3.6 pode ver-se um inversor solar fotovoltaico *Sunny Boy* da empresa *SMA*.



Figura 3.6 – Inversor solar fotovoltaico *Sunny Boy*.

### 3.3. Tecnologia Solar Fotovoltaica

O elemento básico dos painéis solares fotovoltaicos são as células fotovoltaicas. Estas podem ser ligadas em série ou em paralelo. Para se obter maior tensão ligam-se as células em série e para obter maior corrente ligam-se esses conjuntos de células em paralelo.

#### 3.3.1. Tipos de Células Fotovoltaicas

Pode dividir-se os tipos de células fotovoltaicas em três grupos: de primeira geração, de segunda geração e de terceira geração (ver Figura 3.7). A primeira geração de células fotovoltaicas corresponde a células feitas a partir de silício cristalino, sendo as mais usadas no mercado (ver Figura 3.8). A segunda geração de células fotovoltaicas são as células de filme fino, feitas a partir de silício amorfo, ou de outro material semiconductor que é depositado em camadas muito finas num material de baixo custo, como por exemplo vidro, metal ou plástico (ver Figura 3.9) [46]. Dentro da terceira geração de células fotovoltaicas existem as células orgânicas, como por exemplo as DSC (*Dye-Sensitized Solar Cells*), também conhecidas pelo nome de células solares de Grätzel ou células tandem \* (ou multijunção), entre outras, mas que ainda não são comercializáveis em larga escala [47][48].

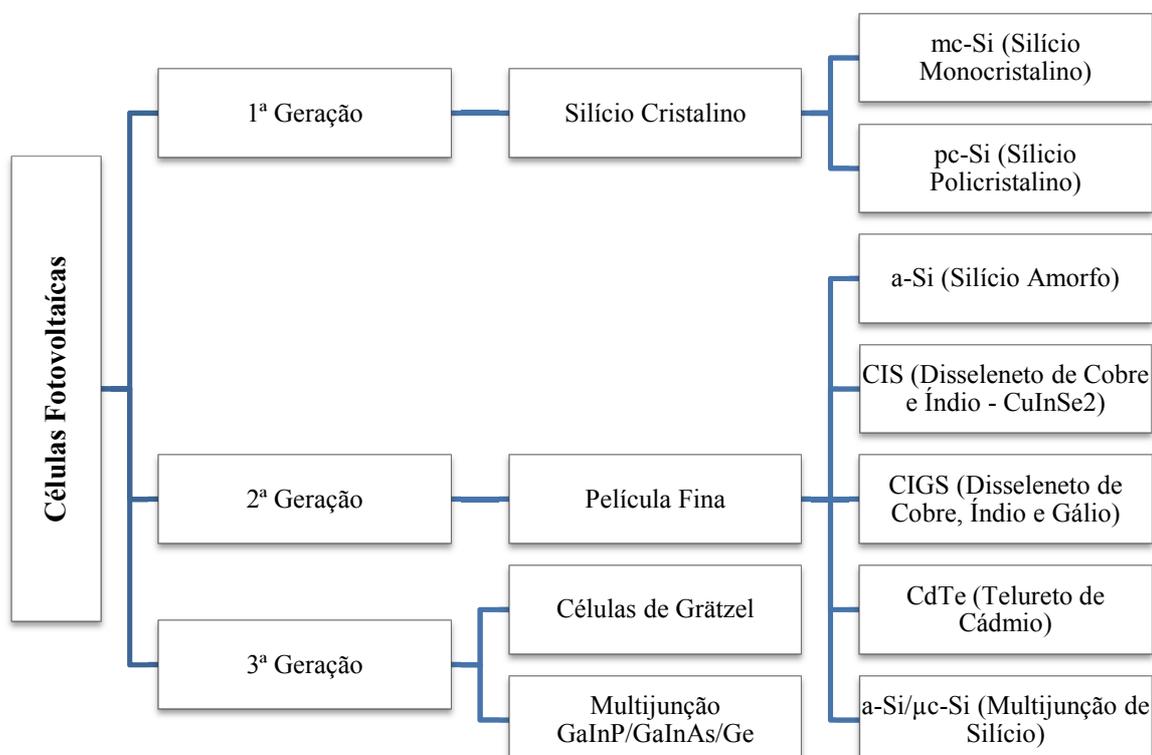


Figura 3.7 – Tipos de células fotovoltaicas.

\* Ligação em série de duas células fotovoltaicas.



Figura 3.8 – Tipos de células fotovoltaicas de silício: (a) Silício monocristalino; (b) Silício policristalino [49].

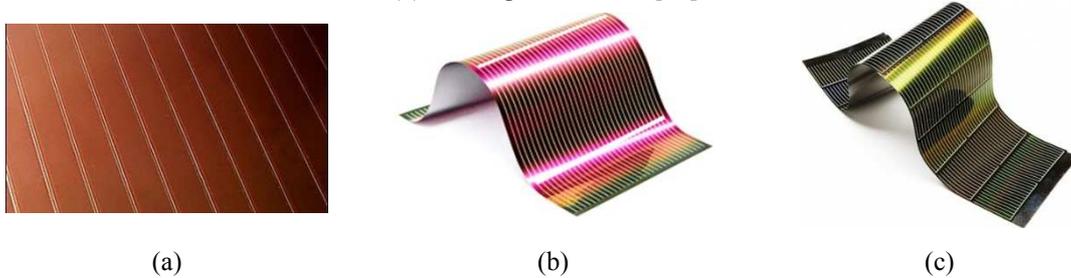


Figura 3.9 – Tipos de células fotovoltaicas de filme fino: (a) a-Si; (b) CIGS; (c) CdTe [50].

As células fotovoltaicas de película fina são mais finas do que as de silício cristalino, e dessa forma gastam menos matéria-prima e menos energia na sua fabricação (ver Figura 3.10). Têm ainda a vantagem de poderem ser flexíveis. Contudo as células de película fina têm um rendimento mais baixo e um tempo de vida útil menor em relação às células de silício cristalino, havendo ainda o problema da toxicidade das células de Telureto de Cádmio no processo de fabrico [50][51]. Uma célula de película fina multijunção consiste numa célula de silício amorfo (a-Si) com camadas de silício microcristalino ( $\mu\text{c-Si}$ ) aplicadas sobre o substrato [47].

Na Tabela 3.1 podem ver-se os rendimentos em laboratório para diferentes tipos de células fotovoltaicas. Na Tabela 3.2 são apresentadas as vantagens e desvantagens das várias tecnologias de células fotovoltaicas.

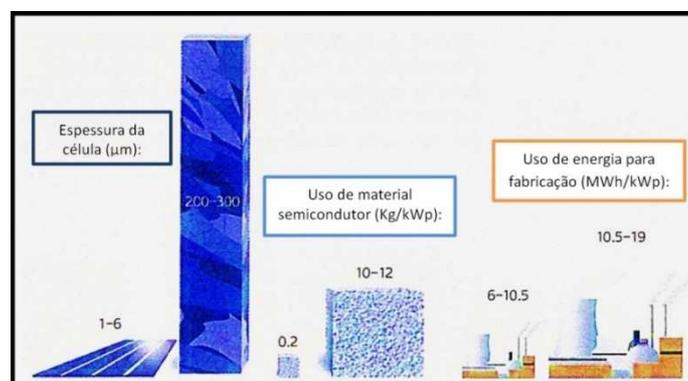


Figura 3.10 – Diferenças entre as células fotovoltaicas de Silício cristalino e de película fina [50].

Tabela 3.1 – Rendimento das principais tecnologias de células fotovoltaicas, medidas sob o espectro global AM1.5 (1000W/m<sup>2</sup>) a uma temperatura de 25 ° C [52].

Tecnologia de Célula Fotovoltaica	Rendimento em Laboratório (%)
Silício Monocristalino	25,0 ± 0.5
Silício Policristalino	20,4 ± 0.5
Silício Amorfo (a-Si)	10,1 ± 0.3
CIGS	19,6 ± 0.6
CdTe	16,7 ± 0.5
a-Si/μc-Si	12,3 ± 0.3
<i>Dye Sensitized</i>	11,0 ± 0.3
GaInP/GaInAs/Ge	34,1 ± 1.2

Tabela 3.2 – Comparação entre diferentes tipos de células fotovoltaicas [47][50][51][53].

Tecnologia	Vantagens		Desvantagens	
Silício Monocristalino	- Vida útil do painel elevada.	- Rendimento muito bom.	- Custo elevado. - Baixo rendimento com baixa radiação solar.	
Silício Policristalino		- Rendimento bom, mas menor do que o de Silício cristalino. - Mais barato do que o Silício monocristalino.	- Baixo rendimento com baixa radiação solar.	
Película fina Silício Amorfo	- Menos sensíveis a altas temperaturas. - Menos alterados pela sombra. - Flexibilidade.	- Funciona melhor com radiação difusa. - Mais barato do que o Silício cristalino.	- Precisam de uma área maior para atingir a mesma potência das células de silício cristalino.	- Baixo rendimento com muita radiação solar. - Vida útil do painel (por volta dos 10 anos). - Rendimento diminui com o tempo, devido à degradação com a luz.
Película fina CIS/CIGS		- São os mais eficientes, entre as tecnologias de película fina - Os materiais usados não têm problema de toxicidade - Não se degradam com a ação da luz		- O Índio é um material raro, logo mais caro que o Silício.
Película fina CdTe		- É o mais barato dentro das células de película fina. - Não se degradam com a ação da luz		- Toxicidade no processo de fabrico

Na Figura 3.11 pode ver-se que as células fotovoltaicas multijunção usam uma maior parte do espectro solar, melhorando o seu rendimento em comparação com as de silício.

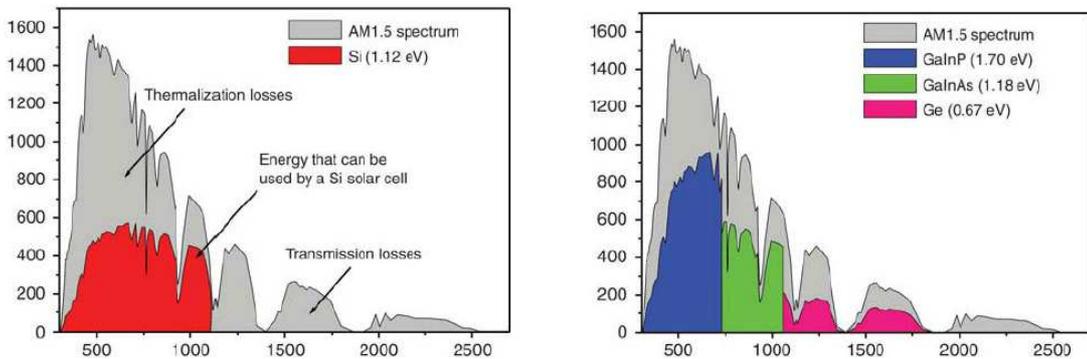


Figura 3.11 – Espectro solar AM1,5 e as partes do espectro que teoricamente podem ser usadas pelas: (a) Células fotovoltaicas de silício; (b) Células fotovoltaicas multijunção [48].

### 3.3.2. Funcionamento de uma Célula Fotovoltaica de Silício

O efeito fotovoltaico é definido como sendo a transformação da radiação solar em energia elétrica. Para este processo são utilizados materiais semicondutores. A maior parte das células fotovoltaicas utilizam o Silício, um dos elementos mais abundantes na Terra [38].

Pode dizer-se que a estrutura de uma célula fotovoltaica de Silício é similar à de um diodo de junção, pois é composta por duas camadas de Silício, uma do tipo N, e outra do tipo P (ver Figura 3.12) [54]. A camada de Silício do tipo N é mais fina do que a camada de Silício do tipo P. A célula fotovoltaica é ainda revestida por uma película para reduzir a reflexão da radiação solar, chamada de camada anti-reflexão ou revestimento antirreflexo [38].

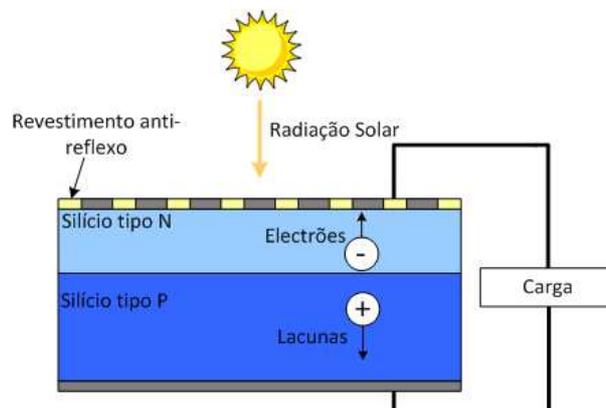


Figura 3.12 – Célula fotovoltaica de Silício.

O silício possui 4 eletrões de valência e quando estes se combinam entre si formam um sólido chamado cristal. Contudo, à temperatura ambiente este cristal comporta-se como um isolante. Para aumentar a sua condutividade são adicionados átomos de impurezas, sendo que a este processo chama-se dopagem. À camada do tipo N são adicionados átomos de fósforo (P), que têm 5 eletrões de valência, e assim os eletrões livres excedem o número de lacunas. À camada do tipo P são adicionados átomos de boro (B), que têm 3 eletrões de valência, e assim as lacunas excedem o número de os eletrões livres [54] [55].

Quando a radiação solar é absorvida pela junção PN, a energia dos fotões é transferida para o material, resultando na criação de um campo elétrico na junção das duas camadas, originando a separação dos portadores de cargas (eletrões e lacunas), e conseqüentemente uma diferença de potencial que vai gerar uma corrente elétrica, caso haja uma carga ligada. Para isso, a célula fotovoltaica tem contactos metálicos, de alumínio ou prata, em ambos os lados da junção PN, para conduzir a corrente elétrica induzida pelos fotões.

### 3.3.3. Circuito Equivalente de uma Célula Fotovoltaica

Na Figura 3.13 é apresentado o circuito equivalente simplificado de uma célula fotovoltaica, onde a corrente gerada pela radiação solar é representada por uma fonte de corrente, e a junção PN por um díodo.

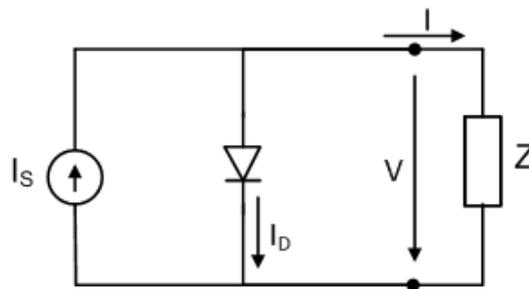


Figura 3.13 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.

A corrente no díodo é dada por (3.1).

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{V}{m \cdot V_t}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

Sendo:

$I_0$  – Corrente de saturação do díodo

$V$  – Tensão aos terminais da célula fotovoltaica

$m$  – Fator de idealidade do díodo ( $1 \leq m \leq 2$ )

$V_t$  – Potencial térmico

Por sua vez  $V_t$  é dado por (3.2).

$$V_t = \frac{k \cdot T}{q} \quad (3.2)$$

Sendo:

$k$  – Constante de Boltzman

$T$  – Temperatura da célula em K (Kelvin)

$q$  – Carga do eletrão

A corrente na carga é dada por (3.3).

$$I = I_S - I_D \Leftrightarrow I = I_S - I_0 \left( e^{\frac{V}{m \cdot V_t}} - 1 \right) \quad (3.3)$$

Sendo:

$I_S$  – Corrente da fonte

Na Figura 3.14 é apresentado o circuito equivalente real de uma célula fotovoltaica, onde  $R_S$  é o parâmetro que representa as perdas por efeito Joule no painel fotovoltaico devido a corrente elétrica que o atravessa, dependendo da resistência elétrica do material da célula e dos seus contactos metálicos.  $R_P$  é o parâmetro que representa as perdas por correntes parasitas. Em caso de sombreamento,  $R_P$  assume grande importância no circuito equivalente da célula fotovoltaica, pois para uma célula sombreada não há corrente produzida pela fonte de corrente ( $I_S$ ), e dessa forma a corrente produzida pelas outras células expostas ao sol e que estejam em série com a células sombreada, passará pela resistência  $R_P$ . Em função do valor de  $R_P$ , e da corrente existente, ocorrerá o aquecimento da célula sombreada, que poderá ser danificada.

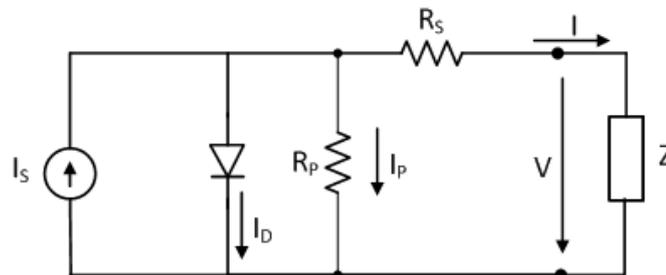


Figura 3.14 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.

A corrente na carga é dada por (3.4).

$$I = I_S - I_D - I_P \Leftrightarrow I = I_S - I_0 \left( e^{\frac{V}{m \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_P} \quad (3.4)$$

Uma célula fotovoltaica sobre a qual não incida radiação solar pode ser representada pelo circuito equivalente mostrado na Figura 3.15, e a corrente na carga é dada por (3.5).

$$I = -I_D \Leftrightarrow I = -I_0 \left( e^{\frac{V}{m \cdot V_t}} - 1 \right) \quad (3.5)$$

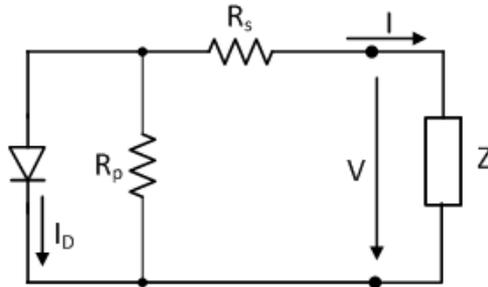


Figura 3.15 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica sombreada.

### 3.3.4. Parâmetros e Curvas Características dos Painéis Fotovoltaicos

Os parâmetros mais importantes dos painéis fotovoltaicos são os seguintes:

- **Potência máxima ( $P_{max}$ ):** Valor máximo de potência produzida.
- **Tensão à potência máxima ( $V_{mp}$ ):** Valor de tensão no ponto de máxima potência (tensão nominal).
- **Corrente à potência máxima ( $I_{mp}$ ):** Valor de corrente no ponto de máxima potência (corrente nominal).
- **Tensão em circuito aberto ( $V_{oc}$ ):** Valor máximo de tensão que uma célula fornece à carga para uma corrente nula.
- **Corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ):** Valor máximo de corrente que uma célula fornece à carga para uma tensão nula.

Os coeficientes de temperatura são parâmetros importantes, que devem ser tidos em conta, devendo ser os mais baixos possíveis:

- Coeficiente de temperatura para  $P_{Max}$  (TK  $P_{max}$ );
- Coeficiente de temperatura para  $V_{oc}$  (TK  $V_{oc}$ );
- Coeficiente de temperatura para  $I_{sc}$  (TK  $I_{sc}$ ).

**NOTA:** O valor destes parâmetros é obtido sob as condições de teste *standard* (STC): irradiância =  $1000 \text{ W/m}^2$ , AM1,5 e temperatura da célula de  $25^\circ\text{C}$ .

As curvas características de um painel fotovoltaico são as curvas de tensão-corrente e de tensão-potência. O ponto da curva tensão-corrente onde o produto é máximo designa-se por *Maximum Power Point* (MPP), e corresponde à potência

máxima produzida pelo painel fotovoltaico (ver Figura 3.16). Também se pode ver que quanto maior for a radiação solar maior vai ser a potência produzida pelo painel. O rendimento do painel fotovoltaico é dado por (3.6):

$$\eta = \frac{P_{max}}{AG} \tag{3.6}$$

Em que:

$P_{max}$  – Potência máxima do painel fotovoltaico (W).

$A$  – Área do painel fotovoltaico (m<sup>2</sup>).

$G$  – Radiação solar incidente (W/m<sup>2</sup>).

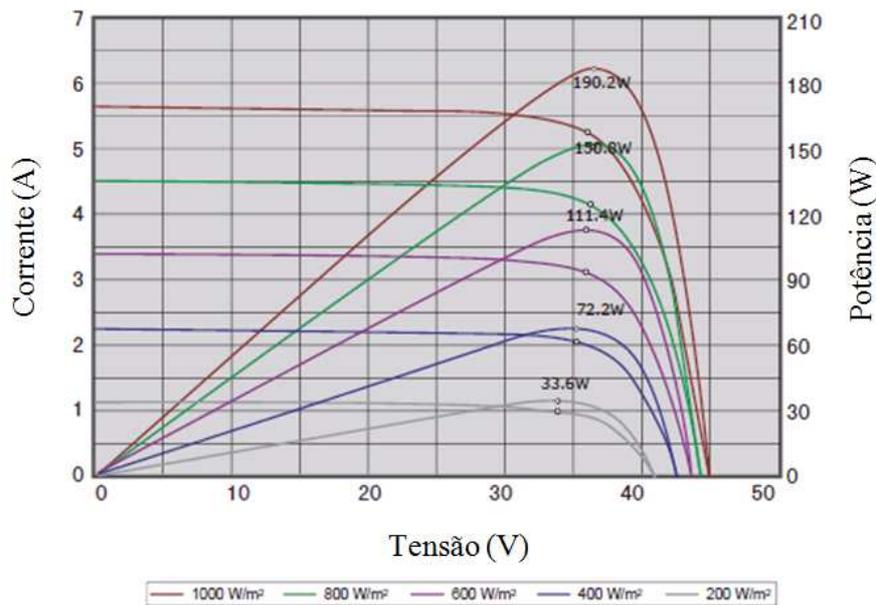


Figura 3.16 – Curvas características tensão-corrente e tensão-potência em função da radiação solar do painel fotovoltaico ET-M572190BB [56].

### 3.3.6. Efeitos do Sombreamento, da Temperatura e do Vento

Há vários parâmetros que podem afetar o rendimento dos painéis solares fotovoltaicos, tais como o sombreamento, a temperatura e o vento.

#### Sombreamento

O sombreamento dos painéis fotovoltaicos afeta o rendimento mas também pode causar danos aos mesmos. Quando se tem vários painéis fotovoltaicos ligados em série e quando há sombreamento total ou parcial num deles, as células fotovoltaicas sombreadas podem aquecer demasiado e danificar-se, uma vez que nesta condição podem ser representadas por uma resistência elétrica (conforme modelo apresentado na Figura 3.15), e são atravessadas pela corrente produzida pelos outros painéis. Para evitar que tal aconteça são usados díodos de *bypass*, que têm como função desviar a corrente e assim proteger o painel solar fotovoltaico (ver Figura 3.17).

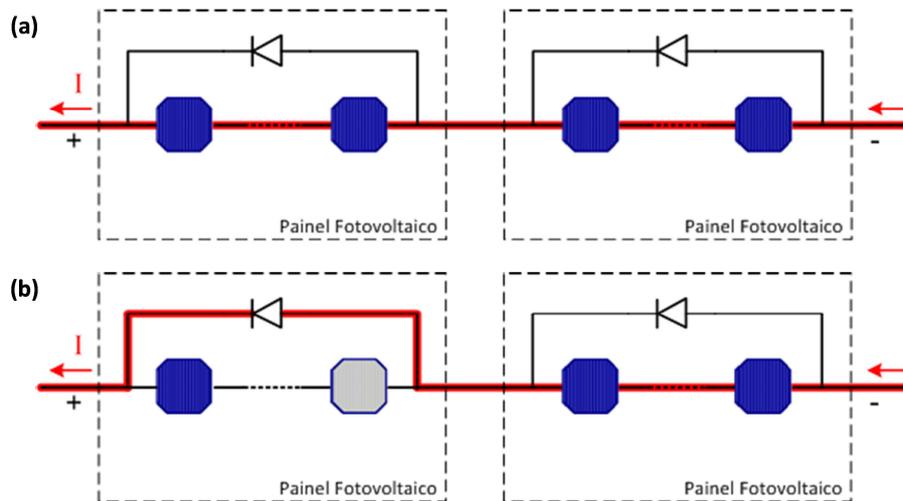


Figura 3.17 – Representação da corrente elétrica numa associação de dois painéis fotovoltaicos em série: (a) Sem sombreamento; (b) Com sombreamento em parte de um dos painéis.

### Temperatura e Vento

A temperatura num painel fotovoltaico varia ao longo do dia devido à irradiância, temperatura ambiente e vento. Num dia de sol com vento os painéis aquecem menos do que num dia de sol sem vento. Na Figura 3.17 pode ver-se o efeito da temperatura num painel fotovoltaico, em que a potência máxima que o painel pode fornecer diminui significativamente com o aumento da temperatura.

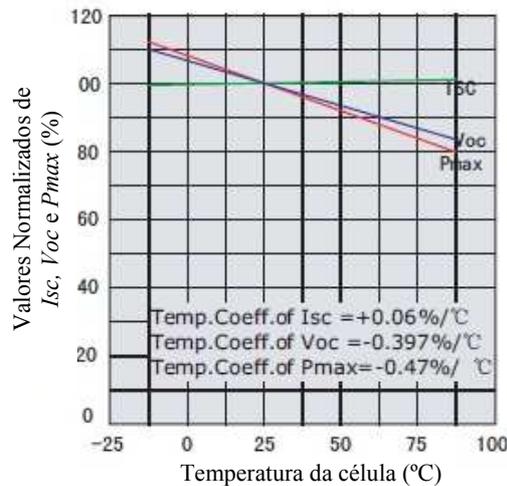


Figura 3.17 – Efeito da temperatura no painel fotovoltaico ET-M53650 [56].

### 3.4. Sistemas de Seguimento do Sol

Para aumentar a produção de energia dos painéis fotovoltaicos usam-se equipamentos chamados de seguidores solares, que têm como função orientar os painéis fotovoltaicos para o Sol.

O fabricante *Sat Control* refere um aumento de produção de energia dos sistemas móveis orientáveis que pode ir até cerca de 61% em relação às estruturas fixas.

Os seguidores solares podem ser classificados relativamente ao número de eixos e à tecnologia do sistema de controlo.

### 3.4.1. Seguidores Solares de Um Eixo e de Dois Eixos

Um seguidor solar de um eixo pode seguir o Sol segundo a direção azimutal, de leste para oeste, ou segundo a direção zenital, norte-sul.

Um seguidor solar de dois eixos segue o Sol segundo a direção azimutal, de leste para oeste, e também segundo a direção zenital, norte-sul.

Nos seguidores solares de um eixo, os painéis podem girar em volta de um eixo vertical, de um eixo inclinado (ou polar), ou de um eixo horizontal (ver Figura 3.18). O eixo inclinado pode ter uma orientação norte-sul, isto é paralelo ao eixo de rotação da Terra (esta inclinação vai depender da latitude do lugar). O eixo horizontal pode ser orientado na direção norte-sul (segundo o sol de leste para oeste) ou na direção leste-oeste (com seguimento norte-sul). Um seguidor solar de dois eixos combina o eixo horizontal com o eixo vertical.

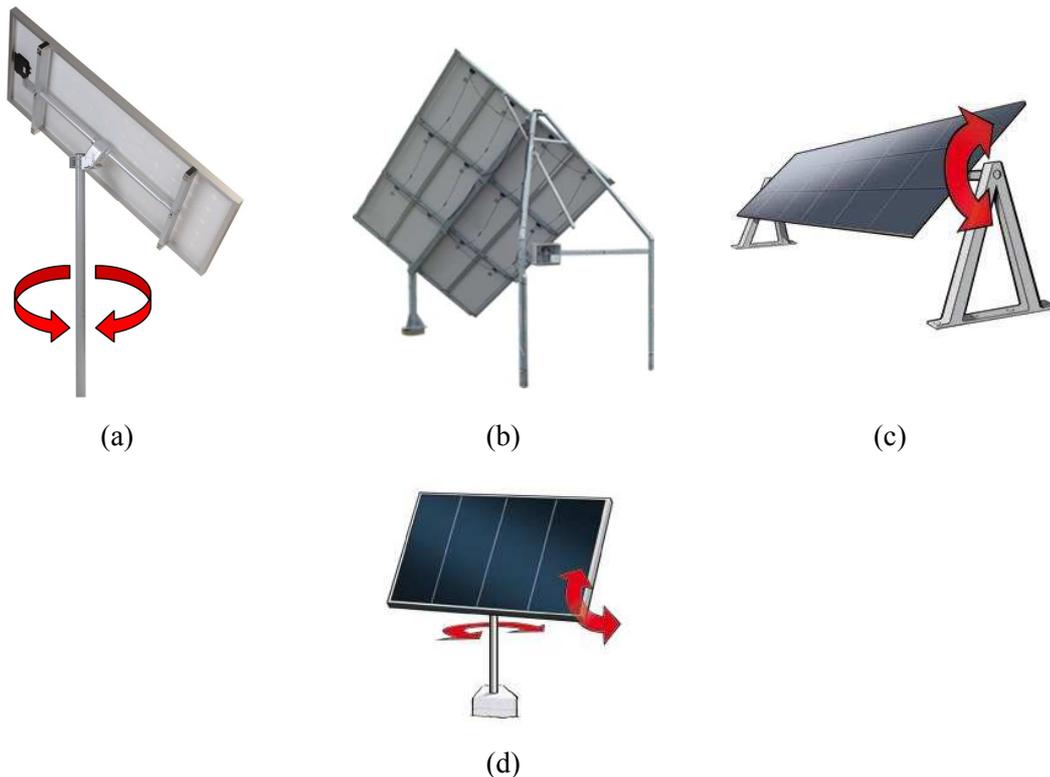


Figura 3.18 – Tipo de eixos: (a) Um eixo vertical; (b) Um eixo polar; (c) Um eixo horizontal; (d) Dois eixos.

### 3.4.2. Tecnologia dos Sistemas de Controlo

Os tipos de sistemas de controlo mais usados nos seguidores solares são:

- Sistema ativo;
- Sistema astronómico;
- Sistema misto.

No sistema ativo são usados um ou mais sensores de radiação solar (ou fotocélulas) que determinam a posição do Sol orientando o painel fotovoltaico nessa direção. Caso o céu esteja encoberto alguns sistemas podem colocar os painéis na posição horizontal.

No sistema astronómico usa-se uma programação com base num relógio astronómico. Desta forma o painel tem uma orientação para o Sol diferente para cada dia do ano. Neste caso não há compensação da sua orientação, mas tem como vantagem um menor desgaste e consumo de energia, sobretudo em dias de céu nublado.

No sistema misto o Sol é seguido através do relógio astronómico e caso seja necessário a orientação é compensada pela leitura dos seus sensores de radiação solar.

### 3.4.3. Parâmetros de um Seguidor Solar

Para escolher um seguidor solar deve ter-se em atenção alguns parâmetros:

- Número de eixos móveis;
- Ângulo azimutal;
- Ângulo de inclinação (ou ângulo zenital);
- Tamanho máximo do painel fotovoltaico;
- Peso máximo do painel fotovoltaico;
- Consumo;
- Sistema de controlo;
- Velocidade máxima do vento.

## 3.5. Conclusões

Neste capítulo foram apresentados vários equipamentos e tecnologias de um sistema solar fotovoltaico, assim como as suas características mais importantes. Foram ainda referidos quais os efeitos que variáveis ambientais, como o sombreamento, o vento e a temperatura têm no rendimento de um painel fotovoltaico.

# CAPÍTULO 4

## Projeto e Implementação do Sistema Fotovoltaico

### 4.1. Introdução

Neste capítulo é explicado como foi feita a implementação da monitorização da tensão e da corrente dos painéis solares fotovoltaicos fixo e móvel, e o processo de montagem destes painéis. São descritos todos os equipamentos usados, as placas de circuito impresso elaboradas, assim como toda a metodologia utilizada. Também é explicado o programa elaborado em *LabView* para a monitorização do processo.

### 4.2. Equipamento e Sistema de Monitorização

A Figura 4.1 ilustra a interligação dos vários equipamentos usados para a implementação do sistema de monitorização dos painéis fotovoltaicos fixo e móvel, que serão explicados nos pontos a seguir.

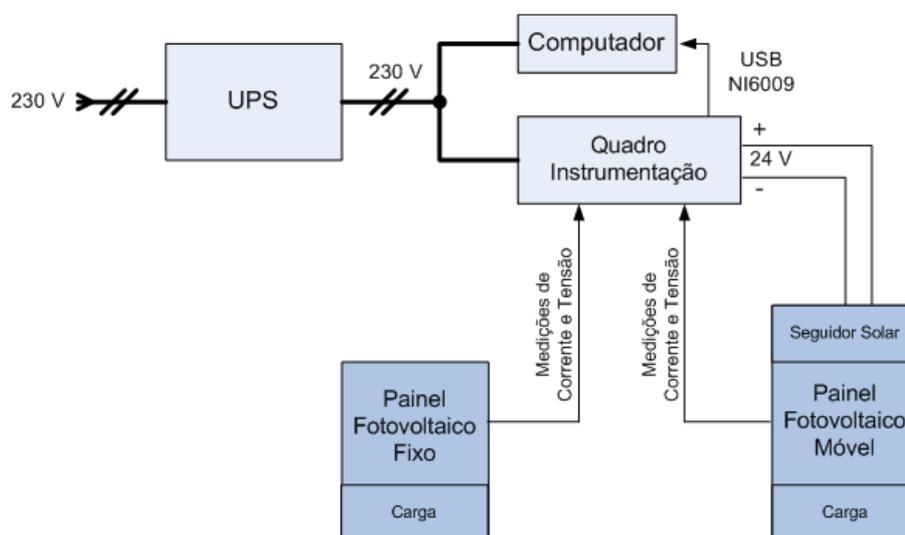


Figura 4.1 – Diagrama de blocos do sistema de monitorização dos painéis fotovoltaicos.

#### 4.2.1. UPS

A UPS (*Uninterruptible Power Supply*) é usada para garantir a alimentação do computador e do seguidor solar em caso de falha da rede elétrica. A UPS usada foi a *TRUST PW-4130M 1300 VA*, e tem como principais características, para além de uma

autonomia de até 70 minutos, fornecer proteção contra sobretensões e subtensões, ter 4 saídas protegidas e possuir função AVR (*Auto Voltage Regulation*) (ver Figura 4.2). A função AVR permite que a UPS funcione sem usar a bateria mesmo quando a tensão é maior ou menor do que o normal.



Figura 4.2 – UPS TRUST PW-4130M 1300 VA.

#### 4.2.2. Painéis Solares Fotovoltaicos

Para o estudo foram utilizados dois painéis solares fotovoltaicos monocristalinos de 50 W, do fabricante *ET Solar*, modelo *ET-M53650*, com as características apresentadas na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2. Estes painéis são constituídos por 36 células monocristalinas ligadas em série. Na Figura 4.3 pode ver-se que a estrutura do painel fotovoltaico é constituída por cinco camadas.

Tabela 4.1 – Características elétricas do painel solar fotovoltaico *ET-M53650*.

<b>Principais características do painel solar fotovoltaico <i>ET-M53650</i></b>	
Potência Máxima ( $P_{max}$ )	50 W
Tensão à potência máxima ( $V_{mp}$ )	18,22 V
Corrente à potência máxima ( $I_{mp}$ )	2,75 A
Tensão em circuito aberto ( $V_{oc}$ )	21,96 V
Corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ )	3,04 A
Coeficiente de temperatura para $P_{max}$ (TK $P_{max}$ )	-0,549 %/°C
Coeficiente de temperatura para $V_{oc}$ (TK $V_{oc}$ )	-0,397 %/°C
Coeficiente de temperatura para $I_{sc}$ (TK $I_{sc}$ )	0,06 %/°C
Temperatura normal de funcionamento da célula	44,4 ± 2°C
Valores obtidos sob as condições de teste <i>standard</i> (STC): irradiância = 1000 W/m <sup>2</sup> , AM1,5 e temperatura da célula de 25°C. A temperatura normal de funcionamento da célula foi obtida sob as condições: irradiância = 800 W/m <sup>2</sup> , AM1,5, velocidade do vento = 1 m/s e temperatura ambiente de 20°C.	

Tabela 4.2 – Características físicas do painel solar fotovoltaico *ET-M53650*.

Peso	6 kg
Largura	445 mm
Comprimento	980 mm
Espessura	35 mm

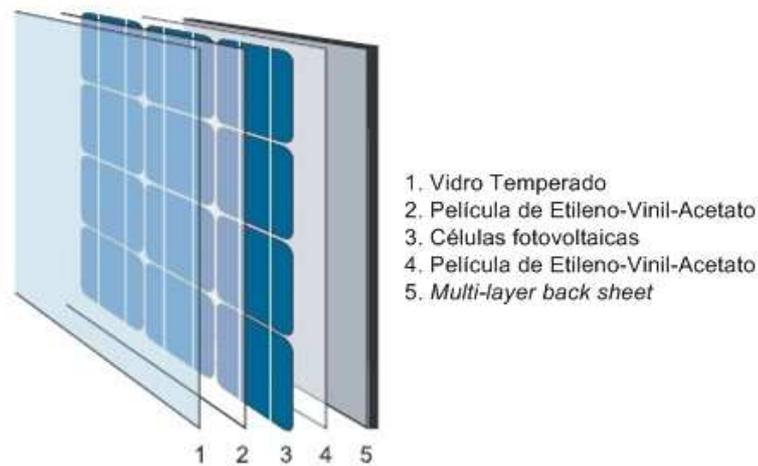


Figura 4.3 – Estrutura do painel solar fotovoltaico monocristalino *ET-M53650* da *ET Solar* [56].

Na Figura 4.4 são apresentadas as curvas características da tensão-corrente e da tensão-potência em função da radiação solar do painel solar fotovoltaico *ET-M53650*. Estas curvas mostram qual a variação da tensão, corrente e potência consoante a radiação solar.

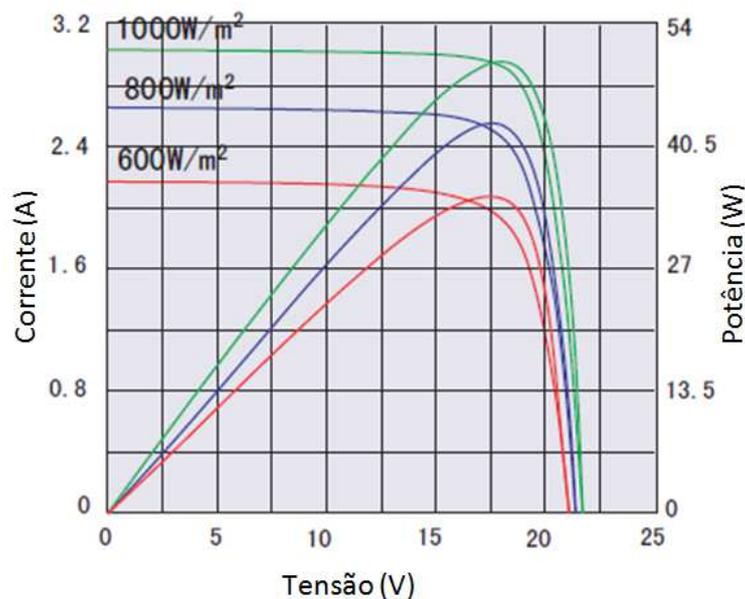


Figura 4.4 – Curvas características tensão-corrente e tensão-potência em função da radiação solar do painel fotovoltaico *ET-M53650* [56].

Na Figura 4.5 é mostrado o diodo de *bypass* na caixa de ligações dos painéis fotovoltaicos. O ânodo do diodo está ligado ao terminal negativo e o cátodo do diodo está ligado ao terminal positivo. Na eventualidade de ter de se ligar dois ou mais painéis fotovoltaicos em série, este diodo tem como função proteger o painel fotovoltaico no caso de haver sombreamento, como já foi explicado no capítulo 3.



Figura 4.5 – Diodo de *bypass* na caixa de ligações do painel solar fotovoltaico ET-M53650.

#### 4.2.3. Seguidor Solar

Foi usado um seguidor solar de um eixo do fabricante *Sat Control*, modelo *SunTracer OG+ with backstructure / 383106390135 / SM3SPMOG+* (0,2 kWp), mostrado na Figura 4.6. O sistema de controlo deste seguidor solar é o sistema astronómico. Para um correto seguimento do Sol é necessário sincronizar o relógio interno do seguidor solar com o tempo solar. As suas principais características são as mostradas na Tabela 4.3.

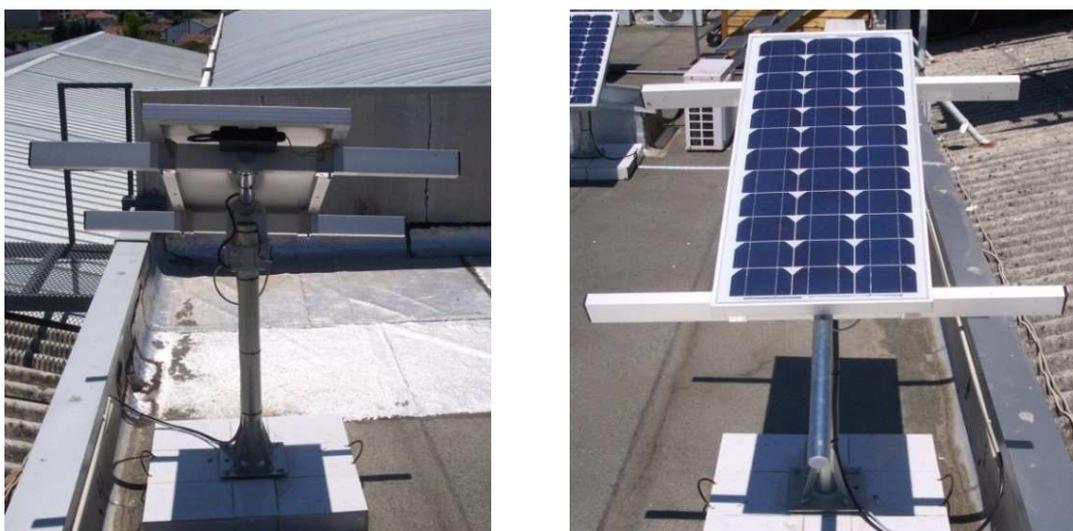


Figura 4.6 – Seguidor solar com estrutura de fixação dos painéis fotovoltaicos.

Tabela 4.3 – Principais características do seguidor solar [57].

Principais características do seguidor solar	
Número de eixos móveis	1
Ângulo de rotação horizontal (azimutal)	96° (valor típico) 100 ° (valor máximo)
Ângulo de inclinação	Até 75° (Ajuste manual)
Alimentação do motor	Entre 12 V e 69 V CC. Valor recomendado de 24 V CC
Tamanho máximo do painel fotovoltaico	Para painéis até 2 m <sup>2</sup>
Peso máximo do painel fotovoltaico	25 kg
Consumo	<200 mA ± 25% para painéis de 50 W
Velocidade máxima do vento	130 km/h

#### 4.2.4. Quadro de Instrumentação

O quadro de instrumentação é onde estão colocadas todas as proteções e circuitos eletrônicos necessários à aquisição de dados. Na montagem deste quadro foi usada uma caixa estanque com IP56 da empresa *GEWISS*, modelo *GW44430*. Para facilitar as ligações foram colocados bornes de ligação, conforme mostrado na Figura 4.7. O quadro de instrumentação é alimentado a 230 V CA, e é protegido através de um interruptor diferencial bipolar de 40 A, com sensibilidade de 300 mA.

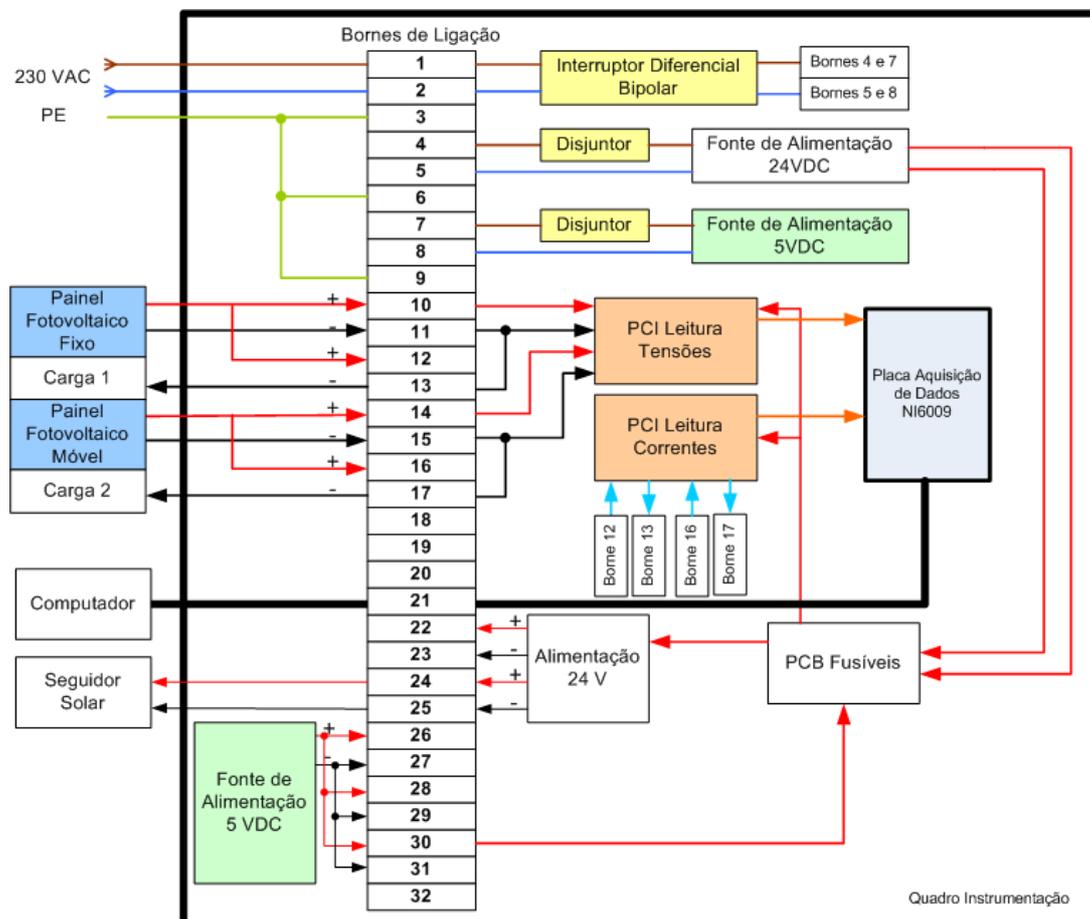


Figura 4.7 – Diagrama de blocos do quadro de instrumentação.

Foram usadas duas fontes de alimentação, uma de 24 V CC, 5 A para alimentar o seguidor solar, e outra de 5 V CC, 1 A para alimentar as placas de circuito impresso (PCI) (ver Figura 4.8 e Figura 4.9). Estas fontes são protegidas por disjuntores magneto térmicos de 6 A e 2 A respetivamente.



Figura 4.8 – Fonte de 24V CC TRACO POWER TXH 120-124.



Figura 4.9 – Fonte de 5V CC TRACO POWER TIW 06-105.

Para proteger os circuitos alimentados a 24 V e a 5 V, foi feita uma placa de circuito impresso com fusíveis (ver Figura 4.10).

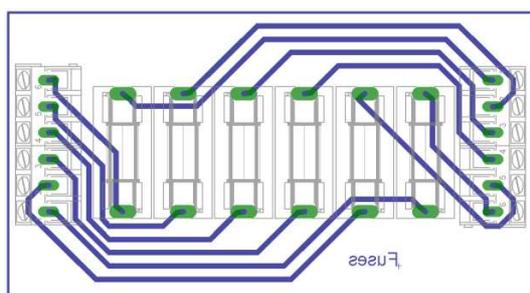


Figura 4.10 – Layout da placa dos fusíveis, realizado no Eagle.

Pode ver-se na Figura 4.11 as entradas e saídas da placa de circuito impresso com os fusíveis. Os bornes 1 e 2 estão a uma tensão de 24 V CC e os bornes 3, 4, 5 e 6 estão a uma tensão de 5 V CC. Os fusíveis usados são do tipo gG, que atuam em caso de sobrecarga ou curto-circuito.



Figura 4.11 – Ligações da placa de circuito impresso (PCI) de proteção.

Na Figura 4.12. pode ver-se o quadro de instrumentação montado. As placas de circuito impresso que fazem a leitura de tensões e correntes são explicadas mais adiante.

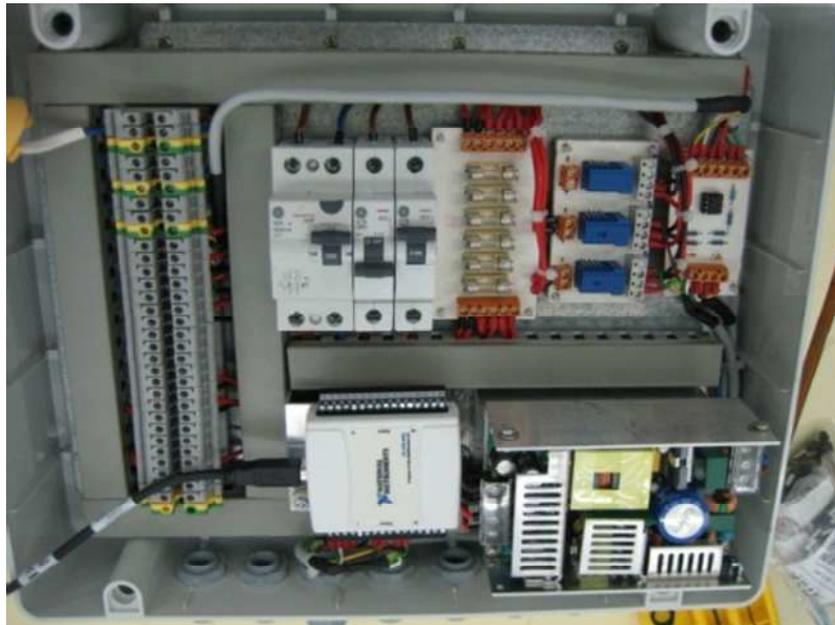


Figura 4.12 – Quadro de instrumentação.

#### 4.2.5. Placa de Aquisição de Dados

Para fazer a monitorização de dados através do computador foi utilizada uma placa de aquisição de dados com interface USB da *National Instruments*, modelo *NI6009*. A placa *NI6009* foi escolhida para o estudo uma vez que se trata de uma placa de baixo custo, e dispõe das características necessárias para aquisição das tensões e correntes dos painéis fotovoltaicos. A *NI6009* dispõe de 8 entradas analógicas, tem uma resolução de 14 bits, e taxa de amostragem de 48 000 amostras por segundo.

Para monitorização dos dois painéis fotovoltaicos são utilizadas 4 entradas analógicas, 2 entradas para as tensões e 2 para as correntes, uma vez que se pretende medir a potência que ambos os painéis fornecem. Na Figura 4.13 são mostradas as ligações das placas de circuito impresso que fazem a leitura de tensões e correntes para a placa *NI6009*.

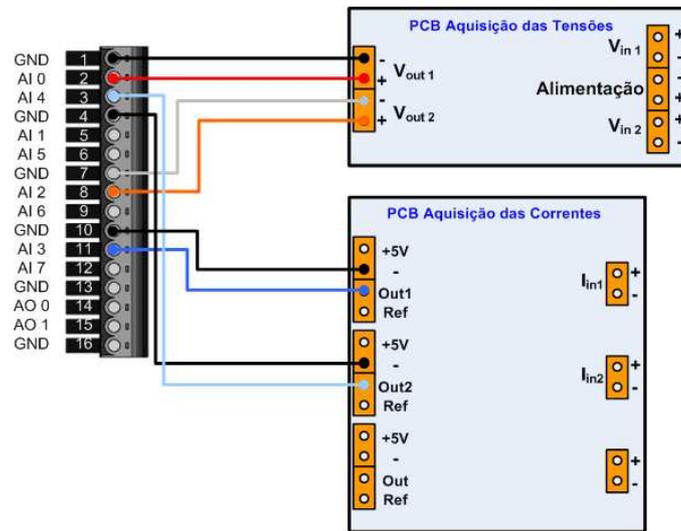


Figura 4.13 – Ligações à placa de aquisição de dados NI6009.

#### 4.2.6. PCI para Leitura de Tensões

Como a tensão à potência máxima que os painéis podem fornecer é de 18,22 V e a tensão máxima que a placa de aquisição de dados pode medir é de 10 V (tensão entre massa e sinal analógico), foi necessário preparar um circuito que dividisse a tensão de entrada, de maneira a que a tensão nos painéis fotovoltaicos possa ser lida.

Na Figura 4.14 pode ver-se o circuito usado para medir a tensão de cada um dos painéis fotovoltaicos através de um divisor de tensão e de um seguidor de tensão.

Para o circuito seguidor de tensão usou-se o amplificador operacional *TLC2252a*, da *Texas Instrument*, por permitir uma alimentação entre 0 V e 5 V, por ter baixo consumo, elevada impedância de entrada e dois amplificadores operacionais no mesmo circuito integrado. Escolheu-se uma alimentação entre 0 V e 5 V por existirem outros circuitos alimentados com esta tensão.

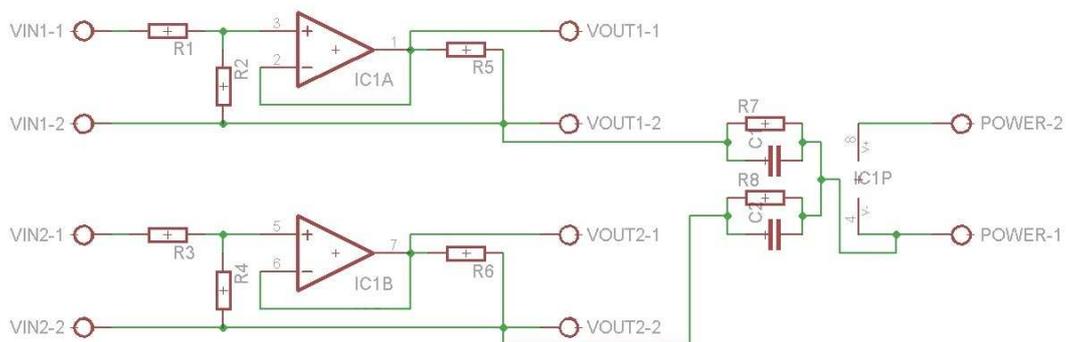


Figura 4.14 – Esquemático do circuito usado para medir tensões, realizado no *Eagle*.

O divisor de tensão é usado para dividir a tensão de entrada por quatro. Assim se a entrada for de 20 V a saída será de 5 V, que corresponde à tensão máxima na saída do amplificador operacional.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1+R_2} \cdot V_{in} \quad (4.1)$$

As resistências  $R_1$  e  $R_2$  foram dimensionadas da seguinte forma:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1+R_2} \cdot V_{in} \Leftrightarrow V_{out} \cdot (R_1+R_2) = R_2 V_{in} \Leftrightarrow R_1 V_{out} + R_2 V_{out} = R_2 \cdot V_{in} \quad (4.2)$$

$$\Leftrightarrow R_1 = \frac{R_2(V_{in}-V_{out})}{V_{out}}$$

Tomando  $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $V_{in} = 20 \text{ V}$ ,  $V_{out} = 5 \text{ V}$

$$R_1 = \frac{1 \times 10^3 (20-5)}{5} \Leftrightarrow R_1 = 3 \text{ k}\Omega$$

Logo,

$$R_2 = R_4 = 1 \text{ k}\Omega \text{ e } R_1 = R_3 = 3 \text{ k}\Omega$$

$$R_5 = R_6 = 10 \text{ k}\Omega$$

O *layout* do circuito para leitura das tensões, assim como a placa de circuito impresso (PCI) implementada, são mostrados na Figura 4.15 e na Figura 4.16.

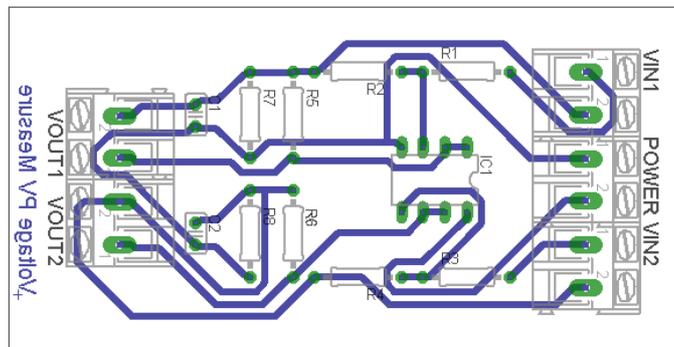


Figura 4.15 – *Layout* do circuito usado para medir tensões, realizado no software Eagle.

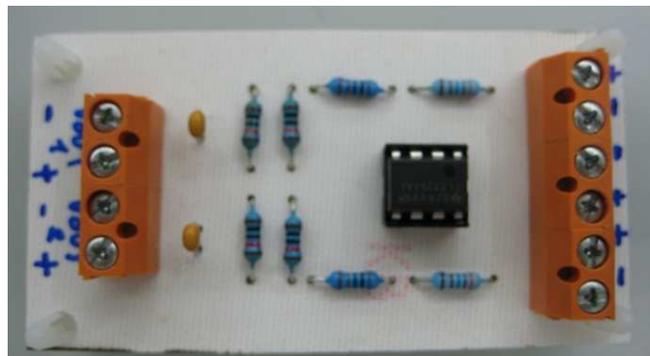


Figura 4.16 – PCI utilizada para medir tensões dos painéis fotovoltaicos.

### 4.2.7. PCI para Leitura de Correntes

Para fazer a leitura das correntes produzidas pelos painéis fotovoltaicos foram utilizados sensores de corrente de Efeito Hall da *LEM*, modelo *CKSR 6-NP* (ver Figura 4.17). Estes sensores são alimentados a 5 V CC, medem até 6 A (corrente nominal no primário do sensor), e têm saída em tensão. Têm como vantagens serem de baixo custo e de tamanho reduzido. Na Figura 4.18 é apresentado o esquema de ligação do sensor *CKSR 6N-P*.

O circuito implementado tem três sensores de corrente (ver Figura 4.19), um a mais do que o necessário para esta aplicação, mas que poderá ser utilizado em outras aplicações, num trabalho futuro.

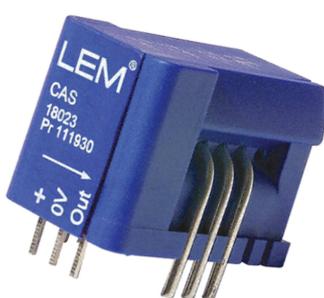


Figura 4.17 – Sensor de corrente de efeito Hall *CKSR 6-NP* da *LEM*.

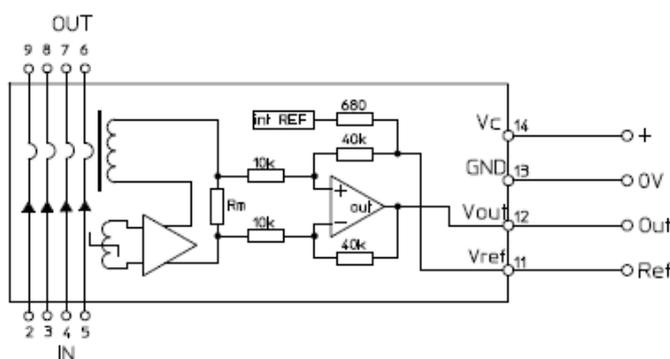


Figura 4.18 – Esquema de ligação do sensor de corrente de efeito Hall *CKSR 6-NP* da *LEM* [58].

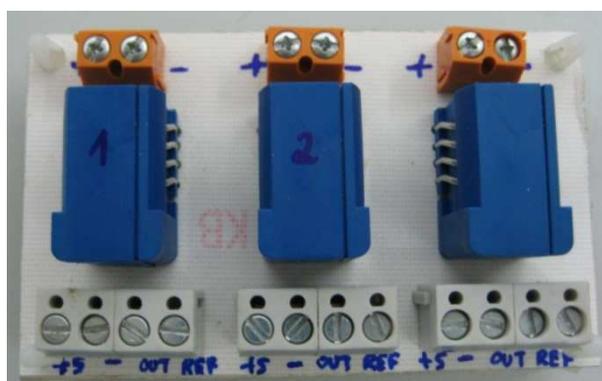


Figura 4.19 – PCI utilizada para medir correntes dos painéis fotovoltaicos.

A tensão de saída, obtida através da folha de dados do sensor de corrente de efeito Hall *CKSR 6-NP* da *LEM*, é dada por (4.3), em que 2,5 V é o valor da tensão de referência interna, ou seja, a tensão de saída é de 2,5 V quando a corrente medida é de 0 A. Nesta equação  $I$  é a corrente medida,  $n$  é o número de voltas e 0,104 é a sensibilidade. A sensibilidade define-se como sendo a razão entre a variação da grandeza de saída pela variação da grandeza de entrada.

$$V_{out} = 2,5 \text{ V} + I \cdot n \cdot 0,104 \quad (4.3)$$

A tensão de saída será tão mais precisa quanto mais espiras forem usadas. Neste caso serão usadas 4 espiras.

Assim:

$$V_{out} = 2,5 \text{ V} + 0,416 I \quad (4.4)$$

Na Tabela 4.4 podem ver-se as medições que foram efetuadas para testar o sensor de corrente de forma a validar a equação (4.4). Com estes dados obteve-se a curva característica deste sensor (ver Figura 4.20). Esta verificação foi feita para certificar que os sensores de corrente estavam calibrados, de forma a não haver problemas aquando da aquisição de dados.

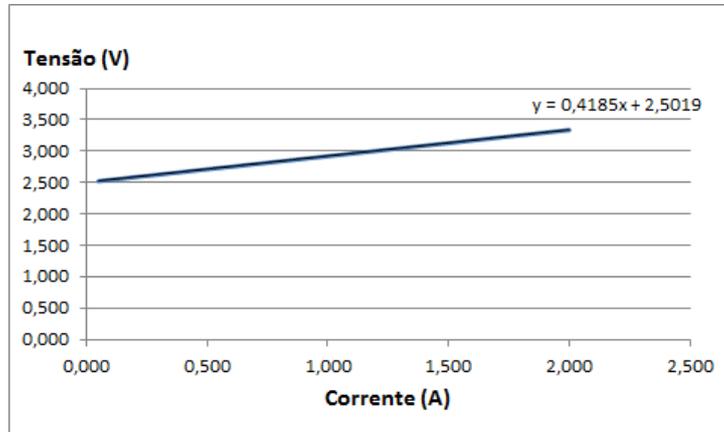


Figura 4.20 – Curva característica do sensor de corrente *CKSR 6-NP*.

Na Figura 4.21 pode ver-se o equipamento que foi utilizado para testar o sensor de corrente. Para isso usou-se uma fonte de tensão, resistências variáveis e dois multímetros digitais, um para medir a tensão e outro para medir a corrente. Para se obter a corrente desejada para o teste dos sensores variou-se a tensão da fonte de tensão e a resistência de carga.



Figura 4.21 – Equipamento usado para testar sensores de corrente.

 Tabela 4.4 – Valores obtidos no teste do sensor de corrente *CKSR 6-NP*.

$I_{in}$ (A)	Valor Medido $V_{out}$ (V)	Valor Teórico Tensão (V) <i>CKSR-6-NP</i>	Valor Teórico Corrente (A) <i>CKSR-6-NP</i>
2,00	3,34	3,33	2,02
1,90	3,30	3,29	1,92
1,80	3,26	3,25	1,82
1,70	3,21	3,21	1,72
1,60	3,17	3,17	1,62
1,50	3,13	3,12	1,51
1,40	3,09	3,08	1,41
1,30	3,05	3,04	1,31
1,20	3,00	3,00	1,21
1,10	2,96	2,96	1,11
1,00	2,92	2,92	1,01
0,90	2,88	2,87	0,91
0,80	2,84	2,83	0,81
0,70	2,80	2,79	0,71
0,60	2,75	2,75	0,61
0,50	2,71	2,71	0,51
0,40	2,67	2,67	0,41
0,30	2,63	2,62	0,31
0,20	2,59	2,58	0,21
0,10	2,54	2,54	0,11
0,09	2,54	2,54	0,10
0,07	2,53	2,53	0,07
0,05	2,52	2,52	0,06

#### 4.2.8. Cargas Usadas nos Painéis Fotovoltaicos

As cargas usadas nos painéis fotovoltaicos foram lâmpadas de halogéneo da *OSRAM* (Lâmpadas Dicroicas *Brillantline* 3500 K, 50 W, 12 V) (ver Figura 4.22).

Lâmpadas dicróicas são lâmpadas de halogéneo com material refletor dicróico, que permite reduzir o calor. A resistência elétrica do filamento a frio (temperatura ambiente) destas lâmpadas é da ordem dos  $0,36 \Omega$  (valor medido experimentalmente). Esta resistência aumenta com a temperatura conforme a equação (4.3):

$$R = R_0 [1 + \alpha (T_f - T_0)] \quad (4.5)$$

Onde:

$R_0$  – Resistência à temperatura inicial.

$\alpha$  – Coeficiente de resistividade ( $0,0024 \Omega/^\circ\text{C}$ ).

$T_f$  – Temperatura final.

$T_0$  – Temperatura inicial.

A  $3226,85 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $3500 \text{ K}$ ) o filamento fica com uma resistência aproximadamente igual a  $3,13 \Omega$ . Cada painel solar fotovoltaico tem como carga três lâmpadas ligadas em série (ver Figura 4.23). Ao estarem ligadas em série as lâmpadas atingem uma temperatura menor e desta forma a sua vida útil aumenta.

Para fixar as cargas a serem usadas pelos painéis fotovoltaicos, foi utilizado perfil de alumínio da série F.013.



Figura 4.22 – Cargas utilizadas nos painéis fotovoltaicos.

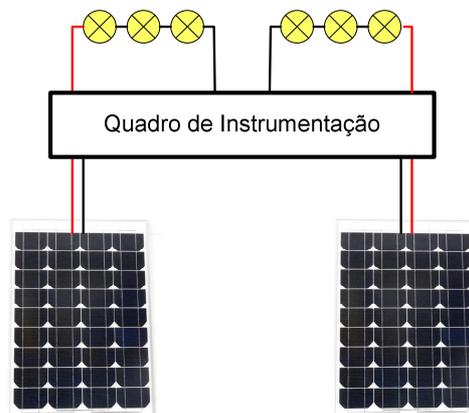


Figura 4.23 – Ligação das cargas aos painéis fotovoltaicos.

### 4.3. Programa em *Labview*

O programa, desenvolvido em *Labview*, faz a aquisição dos valores de tensões e correntes e calcula a potência de cada um dos painéis fotovoltaicos. Assim, o número da amostra, a data, a hora, a tensão do painel fotovoltaico fixo, a corrente do painel fotovoltaico fixo, a tensão do painel fotovoltaico orientável, a corrente do painel fotovoltaico orientável, a potência do painel fotovoltaico fixo, e finalmente a potência do painel fotovoltaico orientável, são guardados num ficheiro de *Excel*, de 6 em 6 minutos. Estes valores também podem ser vistos através da interface mostrada na Figura 4.24.



Figura 4.24 – Interface do sistema de monitorização.

A seguir é feita a descrição do programa principal, de acordo com os pontos indicados na Figura 4.25:

- 1 - Bloco de programa que permite criar um ficheiro de *Excel* com o nome “ProjectoSolar”.
- 2 - Subprograma que calcula as tensões, correntes e potências através dos dados adquiridos pela placa de aquisição *NI6009* (ver Figura 4.27).
- 3 - Variáveis de saída do subprograma descrito no ponto anterior.
- 4 - Conversão de cada variável numa cadeia de caracteres.
- 5 - Subprograma para obtenção da hora e data do sistema.
- 6 - Bloco que permite obter o número da amostra e convertê-la em cadeia de caracteres.
- 7 - Permite concatenar as várias cadeias de caracteres para guardar no ficheiro.
- 8 - Grava os dados no ficheiro a cada 360000 ms, ou seja, de 6 em 6 minutos.

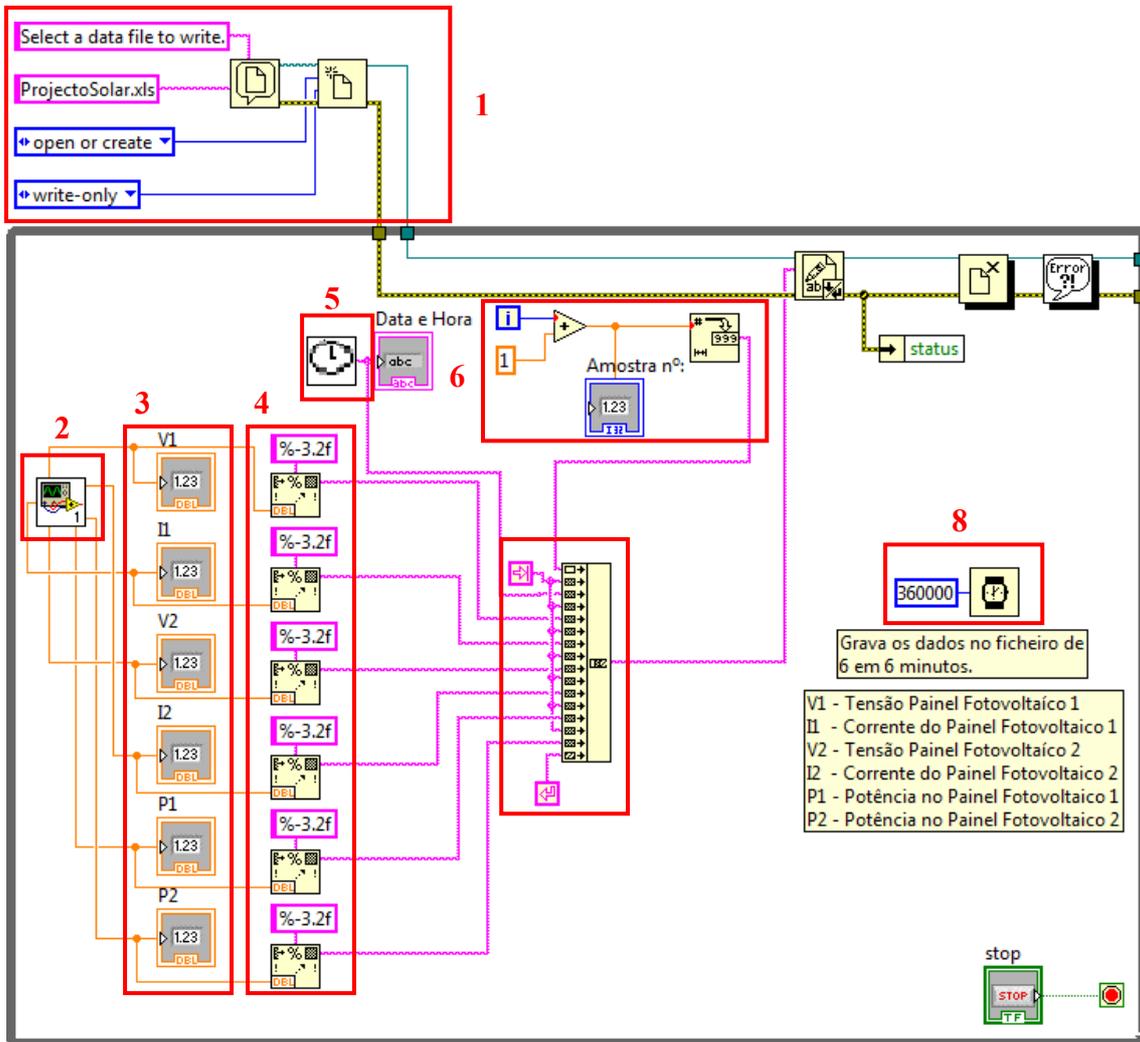


Figura 4.25 – Programa principal para monitorização das tensões e correntes.

Na Figura 4.26 é mostrada a configuração dos canais da placa de aquisição NI6009. Todos os valores adquiridos são tensões e a entrada é definida entre 0 e 5 V.

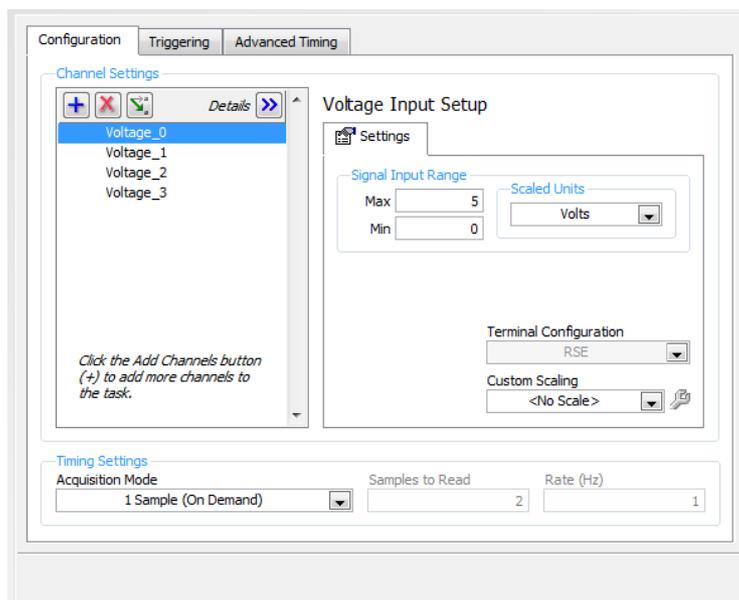


Figura 4.26 – Configuração das entradas analógicas da placa de aquisição NI6009.

Na Figura 4.27 pode ver-se o programa que efetua os cálculos para obter o valor das potências através dos valores das tensões e correntes. A seguir é feita a descrição do programa, de acordo com os pontos indicados nessa figura:

- 1 - Função que permite configurar os canais da placa de aquisição *NI6009* para a aquisição das tensões e correntes.
- 2 - Conversão dos dados adquiridos num *array* de dados para poderem ser utilizados.
- 3 - Permite obter cada elemento do *array* separadamente.
- 4 - Cálculos efetuados para obter os valores de tensão, corrente e potência em cada um dos painéis fotovoltaicos.

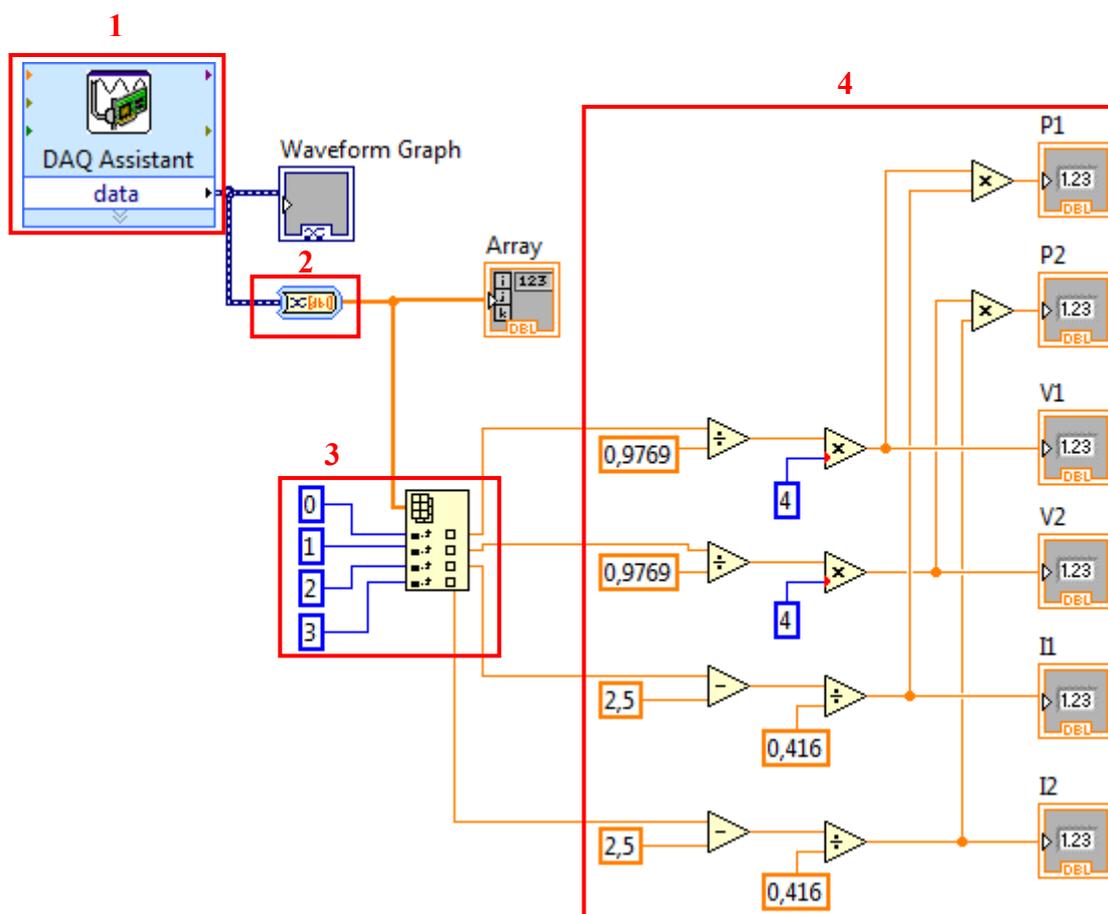


Figura 4.27 – Cálculo das tensões, correntes e potências através dos dados adquiridos pela *NI6009*.

O valor de 0,9769 é um fator de correção devido à diferença entre o valor de entrada da tensão e o valor lido pela placa de aquisição *NI6009*, reduzindo assim o erro final. A Tabela 4.5 mostra os valores de entrada da *NI6009* ( $V_{in}$ ), o valor teórico que deveria ser lido no computador ( $V_{in\ te\acute{o}rico\ PC}$ ), e o valor real que é lido no mesmo ( $V_{in\ PC}$ ). Através desses valores obteve-se o gráfico mostrado na Figura 4.28, a partir do qual se alcançou o valor de 0,9769.

Tabela 4.5 – Valores obtidos na PCI que lê as tensões.

$V_{in}$	$V_{in\ te\acute{o}rico\ PC}$	$V_{in\ PC}$
1,00	0,25	0,22
2,00	0,50	0,48
3,00	0,75	0,73
4,00	1,00	0,97
5,00	1,25	1,23
6,00	1,50	1,47
7,00	1,75	1,70
8,00	2,00	1,94
9,00	2,25	2,20
10,00	2,50	2,44
11,00	2,75	2,69
12,00	3,00	2,94
13,00	3,25	3,18
14,00	3,50	3,42
15,00	3,75	3,67
16,00	4,00	3,90
17,00	4,25	4,15
18,00	4,50	4,41
19,00	4,75	4,61
20,00	5,00	4,90

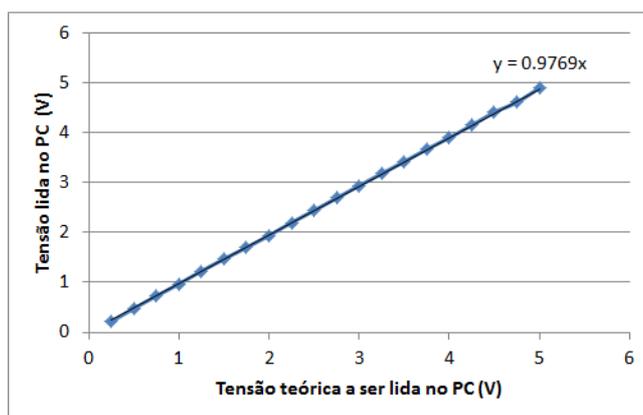


Figura 4.28 – Curva característica do sensor de corrente CKSR 6-NP.

Como já foi explicado anteriormente, a aquisição dos valores de tensão está numa escala entre 0 e 5 V. Assim a tensão do painel fotovoltaico 1 (sistema fixo) é calculada através de (4.6), e a tensão do painel fotovoltaico 2 (sistema móvel) através de (4.7):

$$V_1 = \frac{V_{1 \text{ Adquirido}}}{0,9769} \cdot 4 \quad (4.6)$$

$$V_2 = \frac{V_{2 \text{ Adquirido}}}{0,9769} \cdot 4 \quad (4.7)$$

A corrente dos painéis fotovoltaicos, medida pelos sensores de corrente, é calculada através de (4.8):

$$I = \frac{V_{out} - 2,5}{0,416} \quad (4.8)$$

A potência do painel fotovoltaico 1 do painel fotovoltaico 2 é calculada através de (4.9) e (4.10), respetivamente:

$$P_1 = V_1 I_1 \quad (4.9)$$

$$P_2 = V_2 I_2 \quad (4.10)$$

Na Figura 4.29 pode ver-se o programa que permite obter a hora e data do sistema. A seguir é feita a descrição do programa, de acordo com os pontos indicados nessa figura

- 1 - É obtida a data do sistema com o formato dia/mês/ano (%#d/%#m/%#y).
- 2 - É obtida a hora do sistema, sendo atualizada de segundo em segundo na tela.
- 3 - Permite concatenar as várias cadeias de caracteres.

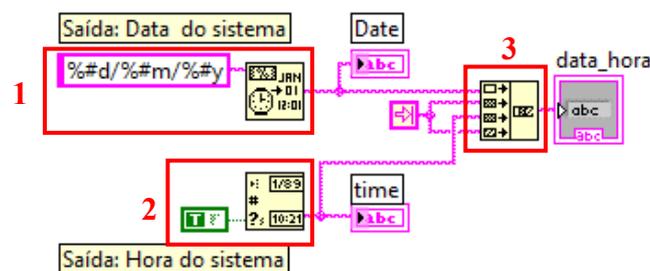


Figura 4.29 – Hora e data do sistema.

#### 4.4. Implementação

A montagem dos painéis fotovoltaicos assim como de todo o equipamento para a monitorização foi feita no telhado da Escola Profissional CIOR (ver Figura 4.30).



Figura 4.30 – Telhado da Escola Profissional CIOR.

#### 4.4.1. Montagem e Orientação dos Painéis Fotovoltaicos

Em primeiro lugar, para a montagem dos painéis fotovoltaicos, teve de se construir duas bases em cimento para que os mesmos ficassem bem apoiados (ver Figura 4.31). No caso do painel fixo foi ainda necessário arranjar uma estrutura em alumínio para que este pudesse ser ajustado e orientado, enquanto no painel móvel tal não foi necessário, uma vez que já tem a estrutura do seguidor solar.



Figura 4.31 – Base em cimento para fixar os painéis fotovoltaicos.

Os ângulos de inclinação foram ajustados em ambos os painéis, uma vez que o painel orientável apenas se move segundo o eixo azimutal. Como já foi referido no capítulo 2, esse ângulo de inclinação varia em função da altura solar. Como os painéis não se movem segundo o eixo zenital, fez-se uma média para os meses de julho e agosto: para o dia 1 de julho  $\alpha = 71,5^\circ$  e para o dia 30 de agosto  $\alpha = 57,3^\circ$ , obtendo-se na média  $\alpha = 64,4^\circ$ . Assim a inclinação dos painéis fica:

$$\beta = 180^\circ - 90^\circ - \alpha \Rightarrow \beta = 90^\circ - 64,4 = 25,6^\circ$$

O ângulo de inclinação ótimo, para o ano todo, para Vila Nova de Famalicão, é de  $34^\circ$  [59]. Para ajustar a inclinação dos painéis fotovoltaicos foi usado um inclinómetro (ver Figura 4.31).



Figura 4.32 – Inclinómetro usado para ajustar a inclinação dos painéis fotovoltaicos.

Em relação ao ângulo de azimute ambos os painéis foram orientados para o sul geográfico.

Para verificação do alinhamento dos painéis fotovoltaicos, elaborou-se um gráfico com os dados de potência tirados no dia 26 de julho de 2011 (ver Figura 4.33). Pode observar-se que ambos os painéis fotovoltaicos estão com o mesmo alinhamento em relação ao sul geográfico, pois no gráfico o meio-dia solar encontra-se a meio das curvas, às 13h40.

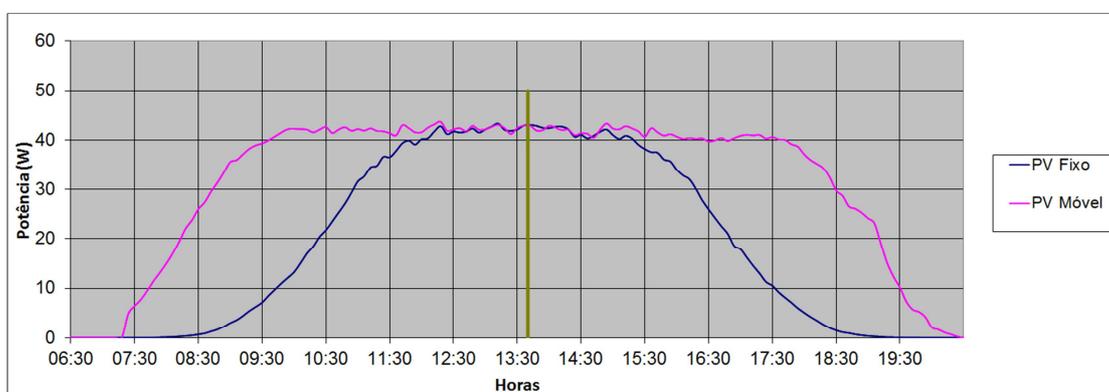


Figura 4.33 – Gráfico que permite verificar o alinhamento dos painéis com o sul geográfico.



Figura 4.34 – Painel fotovoltaico fixo (à esquerda) e painel fotovoltaico com seguidor solar (à direita).

#### 4.4.2. Instalação Elétrica

Todo o equipamento para a monitorização do sistema foi instalado numa casa de madeira que se encontra no telhado da Escola Profissional CIOR, conforme mostrado na Figura 4.35. Para poder usar o sistema de monitorização foi necessário fazer a instalação elétrica dessa casa.



Figura 4.35 – Casa de madeira no telhado da Escola Profissional CIOR.

Em primeiro lugar teve de se ir buscar a alimentação de 230 V CA a uma caixa de derivação situada no telhado (ver Figura 4.36) e levá-la até à casa de madeira (ver Figura 4.37). Para isso usou-se tubo do tipo VD16<sup>1</sup>, cabo H05VV-F 3x2,5<sup>2</sup> e caixas de derivação estanques do sistema *Plexo* da *Legrand*, com Índice de Proteção igual a 55 (IP55).



Figura 4.36 – Caixa de derivação ligada a 230 V CA.

<sup>1</sup> Tubo VD é um tubo em Policloreto de Vinilo (PVC) com IK07.

<sup>2</sup> Cabo harmonizado para uma tensão situada entre 300 e 500 V, com isolamento e bainha em PVC, com 3 condutores de secção igual a 2,5 mm<sup>2</sup>.



Figura 4.37 – Instalação elétrica da casa de madeira.

De seguida procedeu-se à montagem das tomadas (ver Figura 4.37). Como existe apenas um circuito, isto é um disjuntor, o número de tomadas que se podem montar é em regra de 8 tomadas, segundo as Regras Técnicas de Instalações Elétricas em Baixa Tensão (RTIEBT 801.5.3). Nesta montagem foi usada calha da *Legrand* e tomadas triplas de 16 A tipo *Schuko*.



Figura 4.38 – Instalação das tomadas.

Para a ligação dos painéis fotovoltaicos às cargas foi usado cabo solar da *Kabel* (*Radox 125*) preto com secção de 4 mm<sup>2</sup>.

#### 4.5. Custos dos Equipamentos

Na tabela 4.6 são apresentados os custos dos equipamentos e materiais usados neste estudo comparativo de um painel fotovoltaico fixo com um painel fotovoltaico móvel num eixo.

Tabela 4.6 – Custos dos equipamentos e materiais usados neste estudo.

Equipamento		Preço
2 Painéis Fotovoltaicos Monocristalinos de 50 W		395,50 €
Seguidor Solar		299,84 €
Sistema de monitorização:		664,94 €
Placa de aquisição de dados NI6009	269,00 €	
4 Sensores de Efeito Hall <i>CKSR 6-NP</i>	50,48 €	
Fonte de alimentação 24V/5A	98,42 €	
Fonte de alimentação 5V/1A	27,94 €	
Caixa estanque <i>Gewiss IP56</i>	49,10 €	
UPS	120,00 €	
Material eletrónico (Componentes eletrónicos, PCIs)	50,00€	
Material elétrico (bornes, condutores, disjuntores, tomadas...)		120 €
<b>Total</b>		<b>1480,28 €</b>

#### 4.6. Página Web

Para além do trabalho de monitorização foi criada uma página *web* que tem como objetivo numa primeira fase servir de apoio aos alunos dos cursos técnicos de Energias Renováveis da Escola Profissional CIOR (ver Figura 4.39).



Figura 4.39 – Página *web*.

## 4.7. Conclusões

Neste capítulo descreveram-se todos os equipamentos utilizados e desenvolvidos no âmbito deste trabalho, com indicação dos seus custos. Explicou-se o programa em *Labview* que permite monitorizar e registar os dados de tensão e corrente de ambos os painéis fotovoltaicos. Também foi descrito como foi feita a montagem dos painéis fotovoltaicos, assim como a instalação elétrica para o sistema de monitorização e para a alimentação do seguidor solar.

# CAPÍTULO 5

## Resultados Experimentais

### 5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados das medições de tensão e corrente dos painéis solares fotovoltaicos fixo e móvel, que levaram ao cálculo dos valores de potência e energia. Os resultados apresentados referem-se a alguns dias de julho, a alguns dias de agosto, e aos meses de setembro, outubro e novembro de 2011. Em agosto não são apresentados os dados da segunda quinzena, devido à ocorrência de um problema de sobrecarga do disjuntor que alimenta o sistema de monitorização, aquando da realização de obras alheias a este trabalho, ocorridas no telhado da Escola Profissional CIOR. Também houve falhas de algumas horas no registo de dados, em três dias, devido a problemas com a entrada USB do computador.

### 5.2. Validação dos Resultados

Foram analisados os resultados guardados num ficheiro de *Excel*. Antes de realizar qualquer cálculo validaram-se os dados adquiridos, de forma a verificar que não houve nenhum erro grosseiro na medição. Verificou-se para todas as medições realizadas que os valores de corrente de ambos os painéis são inferiores à corrente de curto-circuito dos painéis ( $I_{cc} = 3,04$  A – valor dado pelo fabricante), e que os valores de tensão são inferiores à tensão em circuito aberto dos painéis ( $V_{oc} = 21,96$  V – valor dado pelo fabricante).

### 5.3. Resultados Obtidos e Análise dos Resultados

Com os dados registados elaboraram-se os gráficos apresentados no Apêndice 1. Estes gráficos permitem ver a produção de ambos os painéis fotovoltaicos ao longo do dia, para vários dias. Cada gráfico apresenta a potência produzida para cada um dos painéis ao longo de um dia, com registos feitos a cada 6 minutos. Analisando-os pode ver-se que o sistema móvel capta mais horas de sol do que o sistema fixo. Essa diferença vê-se claramente num dia de céu limpo, como no dia 9 de agosto por exemplo

(ver Figura 5.1). Num dia sem sol os painéis fotovoltaicos não produzem, como ocorreu por exemplo nos dias 26 de outubro e 15 de novembro (ver Figura 5.2). Também se observa que, em dias em que o tempo se alterna entre com sol e nublado, a potência produzida pelos painéis atinge picos superiores aos dos dias apenas com sol. Isto acontece pois os painéis não aquecem tanto, e o seu rendimento nos intervalos em que há sol aumenta, como por exemplo no dia 14 de agosto (ver Figura 5.3). Ao comparar-se o gráfico da Figura 5.1 com o gráfico da Figura 5.3 pode ver-se que no dia 9 de agosto a potência máxima do painel diminui nas horas de maior calor. Ainda se pode ver que no dia 30 de julho o tempo esteve nublado de manhã, pois ambos os sistemas começaram a produzir de forma significativa apenas a partir das 11 h, aproximadamente (ver Figura 5.4). Comparando o dia 8 de agosto com o dia 17 de novembro, vê-se que há menos horas de sol e menores valores máximos de irradiação solar em novembro, e conseqüentemente a produção dos painéis é menor nesse mês (ver Figura 5.5).



Figura 5.1 – Potência produzida pelos painéis ao longo do dia em 9 de agosto de 2011.

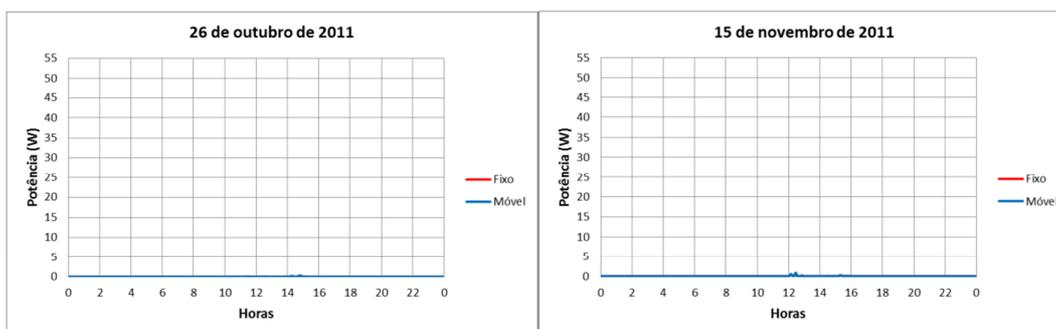


Figura 5.2 – Potência produzida pelos painéis ao longo dos dias 26 de outubro e 15 de novembro de 2011.

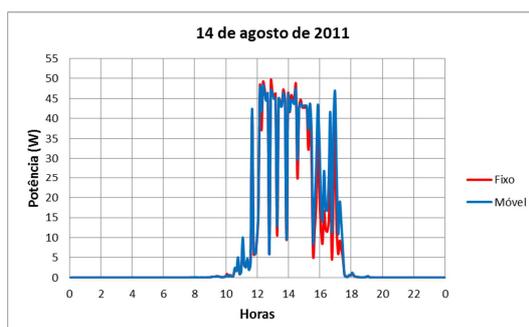


Figura 5.3 – Potência produzida pelos painéis ao longo do dia em 14 de agosto de 2011.

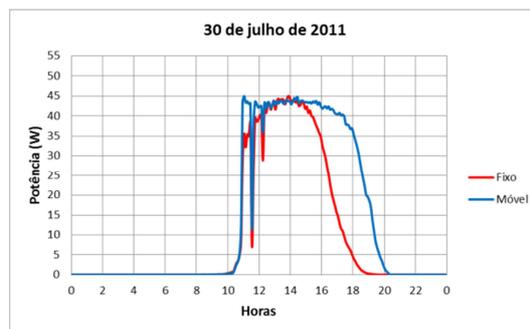


Figura 5.4 – Potência produzida pelos painéis ao longo do dia em 30 de julho de 2011.

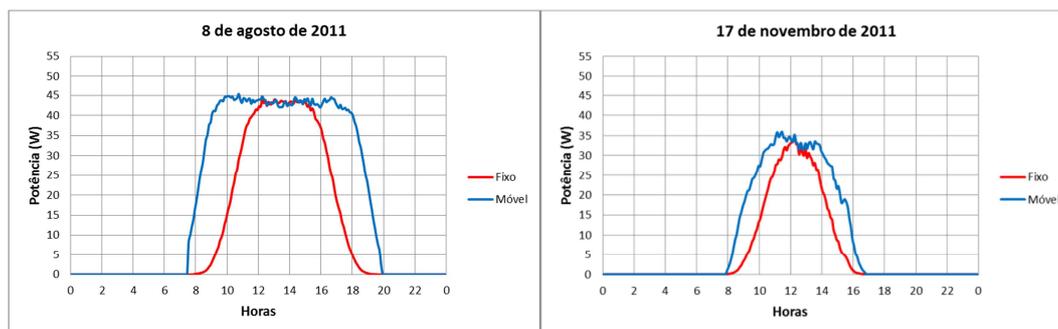


Figura 5.5 – Potência produzida pelos painéis ao longo dos dias 8 de agosto e 17 de novembro de 2011.

Através das Tabelas 5.1 à 5.5, pode fazer-se uma análise quantitativa da produção de ambos os sistemas. Estas tabelas apresentam a potência média ( $P_{\text{média}}$ ) e a energia ( $E$ ) produzida por dia para cada um dos sistemas. A potência média corresponde ao somatório das potências a dividir pelo número de leituras efetuadas num dia pelo sistema de monitorização. A energia é a potência média a multiplicar por 24 horas.

Segundo o fabricante, o aumento de produção em relação a um sistema fixo, num dia de sol não totalmente limpo, pode chegar aos 60%. O mesmo fabricante refere que um sistema de dois eixos pode produzir mais 7% num ano do que um sistema de um eixo (para uma latitude de 46°N) [57].

Analisando agora as diferenças de produção, em dias de sol, pode ver-se que no dia 28 de julho o aumento de produção do sistema móvel em relação ao sistema fixo é de 66% (ver Tabela 5.1). No dia 8 de agosto o aumento de produção do sistema móvel em relação ao sistema fixo é de 65% (ver Tabela 5.2). No dia 6 de setembro o aumento de produção do sistema móvel em relação ao sistema fixo é de 62% (ver Tabela 5.3). No dia 6 de outubro o aumento de produção do sistema móvel em relação ao sistema fixo é de 58% (ver Tabela 5.4). No dia 17 de novembro o aumento de produção do sistema móvel em relação ao sistema fixo é de 52% (ver Tabela 5.5).

Contudo, existem alguns dias em que o aumento de produção é até muito superior a 60%, isto porque nesses dias a produção dos painéis ou ocorre apenas mais no fim do

dia ou apenas no início da manhã, e nestes períodos de tempo o painel móvel acaba por captar mais radiação solar do que o fixo, como se pode ver nas Figura 5.6 e 5.7.

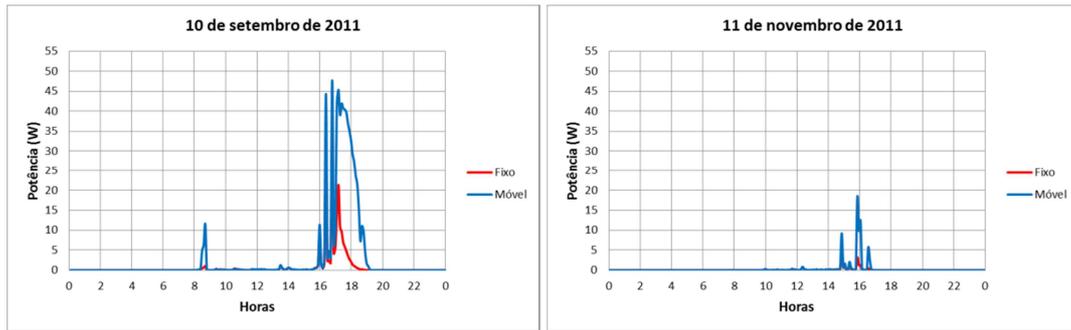


Figura 5.6 – Potência produzida pelos painéis ao longo dos dias 10 de setembro e 11 de novembro de 2011.

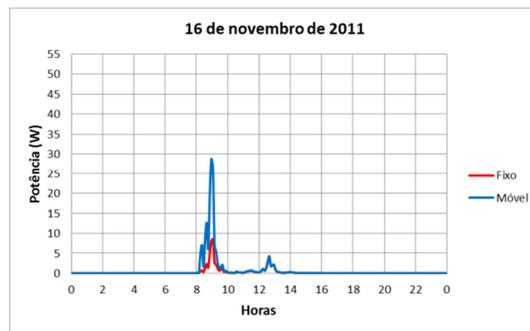


Figura 5.7 – Potência produzida pelos painéis ao longo do dia em 16 de novembro de 2011.

Tabela 5.1 – Valores de potência média e de energia obtidos para os sistemas fixo e móvel referentes a alguns dias do mês de julho de 2011.

Dia	Sistema Fixo		Sistema Móvel		Aumento de produção do sistema móvel em relação ao fixo (%)
	$P_{\text{média}}$ (W)	E (W.h)	$P_{\text{média}}$ (W)	E (W.h)	
28	10,86	260,74	18,07	433,56	66
29	11,13	267,09	16,57	397,59	49
30-	10,00	239,96	14,03	336,79	40
31	10,90	261,66	16,12	386,78	48

Tabela 5.2 – Valores de potência média e de energia obtidos para os sistemas fixo e móvel referentes a alguns dias do mês de agosto de 2011 (\* Dia em que houve interrupção da medição).

Dia	Sistema Fixo		Sistema Móvel		Aumento de produção do sistema móvel em relação ao fixo (%)
	P <sub>média</sub> (W)	E (W.h)	P <sub>média</sub> (W)	E (W.h)	
1	3,11	74,52	3,63	87,08	17
2	2,39	57,36	2,62	62,79	9
3	10,98	263,40	15,91	381,78	45
4	2,19	52,63	2,78	66,63	27
5	6,57	157,66	10,28	246,65	56
6	3,85	92,46	7,10	170,51	84
7	10,06	241,45	14,09	338,05	40
8	11,84	284,09	19,49	467,80	65
9	11,59	278,05	18,87	452,93	63
10	2,79	67,03	7,39	177,45	*
11	11,09	266,24	17,61	422,61	59
12	10,05	241,21	16,15	387,72	61
13	10,07	241,70	14,25	342,10	42
14	7,48	179,43	8,26	198,21	10
15	7,72	185,19	11,81	283,50	53
16	8,78	210,64	9,57	229,79	*

Tabela 5.3 – Valores de potência média e de energia obtidos para os sistemas fixo e móvel referentes ao mês de setembro de 2011 (\* Dia em que houve interrupção da medição).

Dia	Sistema Fixo		Sistema Móvel		Aumento de produção do sistema móvel em relação ao fixo (%)
	$P_{\text{média}}$ (W)	E (W.h)	$P_{\text{média}}$ (W)	E (W.h)	
1	7,04	169,03	8,49	203,73	21
2	0,13	3,09	0,18	4,40	42
3	5,33	127,92	5,95	142,92	12
4	9,81	235,48	14,28	342,74	46
5	10,90	261,65	17,33	415,93	59
6	11,06	265,34	17,94	430,58	62
7	11,01	264,33	17,86	428,52	62
8	10,13	243,10	14,76	354,29	46
9	7,40	177,54	9,77	234,36	32
10	0,85	20,29	3,01	72,16	256
11	4,09	98,17	5,08	121,98	24
12	10,47	251,21	16,91	405,85	*
13	10,35	248,39	16,68	400,33	61
14	7,61	182,67	11,94	286,67	57
15	8,84	212,27	12,66	303,94	43
16	8,11	194,67	11,73	281,48	45
17	9,81	235,42	13,44	322,52	37
18	10,57	253,75	16,71	400,98	58
19	10,12	242,82	16,54	396,96	63
20	10,31	247,45	16,74	401,66	62
21	8,38	201,11	13,48	323,48	61
22	7,70	184,79	10,33	247,83	34
23	1,08	25,86	2,13	51,03	97
24	2,79	67,01	3,28	78,64	17
25	10,06	241,54	15,89	381,33	58
26	9,78	234,81	14,26	342,29	46
27	3,57	85,63	4,06	97,49	14
28	2,20	52,74	2,86	68,69	30
29	8,67	208,05	12,14	291,40	40
30	5,99	143,78	8,25	198,01	38
<b><math>\Sigma</math> E(fixo)</b>	<b>5379,92</b>	<b><math>\Sigma</math> E(móvel)</b>	<b>8032,21</b>	<b>49</b>	

Tabela 5.4 – Valores de potência média e de energia obtidos para os sistemas fixo e móvel referentes ao mês de outubro de 2011 (\* Dia em que houve interrupção da medição).

Dia	Sistema Fixo		Sistema Móvel		Aumento de produção do sistema móvel em relação ao fixo (%)
	P <sub>média</sub> (W)	E (W.h)	P <sub>média</sub> (W)	E (W.h)	
1	8,54	204,84	12,95	310,78	52
2	8,34	200,07	12,83	308,02	54
3	7,66	183,87	11,83	284,03	54
4	7,08	169,98	10,96	263,13	55
5	8,09	194,27	13,02	312,54	61
6	5,90	141,58	8,28	198,76	40
7	7,23	173,51	11,44	274,60	58
8	8,98	215,46	14,74	353,71	64
9	9,14	219,37	15,12	362,91	65
10	8,65	207,65	14,23	341,57	64
11	8,28	198,64	13,13	315,08	59
12	7,34	176,05	12,12	290,84	65
13	6,76	162,34	11,02	264,60	63
14	4,76	114,23	7,04	168,91	48
15	3,93	94,25	6,04	144,89	54
16	2,54	60,91	3,73	89,47	47
17	4,51	108,33	7,01	168,19	55
18	5,57	133,76	9,30	223,24	67
19	6,72	161,39	11,11	266,71	65
20	7,01	168,36	11,76	282,27	68
21	6,98	167,40	11,64	279,40	67
22	3,78	90,63	5,65	135,67	50
23	0,03	0,66	0,03	0,78	19
24	4,48	107,48	6,30	151,25	41
25	4,55	109,18	6,13	147,14	35
26	0,01	0,23	0,01	0,25	10
27	1,42	34,11	2,97	71,34	109
28	7,92	190,00	12,38	297,20	56
29	4,96	119,07	8,23	197,63	66
30	5,16	123,73	6,23	149,41	21
31	0,92	22,10	1,52	36,40	65
<b>Σ E(fixo)</b>		<b>4253,48</b>	<b>Σ E(móvel)</b>	<b>6690,74</b>	<b>57</b>

Tabela 5.5 – Valores de potência média e de energia obtidos para os sistemas fixo e móvel referentes ao mês de novembro de 2011.

Dia	Sistema Fixo		Sistema Móvel		Aumento de produção do sistema móvel em relação ao fixo (%)
	$P_{\text{média}}$ (W)	E (W.h)	$P_{\text{média}}$ (W)	E (W.h)	
1	2,43	58,26	3,06	73,36	26
2	0,35	8,32	0,35	8,46	02
3	0,43	10,38	0,72	17,22	66
4	2,70	64,90	3,16	75,86	17
5	6,77	162,51	9,76	234,21	44
6	7,36	176,59	11,60	278,43	58
7	6,59	158,26	9,78	234,66	48
8	0,02	0,43	0,05	1,19	178
9	1,20	28,70	2,11	50,52	76
10	0,42	10,07	0,54	13,03	29
11	0,10	2,30	0,30	7,23	214
12	1,28	30,69	1,69	40,61	32
13	0,17	4,02	0,22	5,20	30
14	0,06	1,40	0,10	2,36	69
15	0,02	0,37	0,02	0,37	0
16	0,28	6,62	0,70	16,77	153
17	5,80	139,23	8,77	210,39	51
18	0,06	1,46	0,14	3,25	123
19	3,01	72,30	3,75	89,90	24
20	4,39	105,29	6,54	157,07	49
21	0,16	3,78	0,33	7,94	110
22	5,48	131,60	7,28	174,82	33
23	5,50	132,05	8,22	197,26	49
24	5,72	137,25	8,47	203,30	48
25	4,05	97,23	5,90	141,59	46
26	5,27	126,45	7,81	187,37	48
27	4,95	118,69	6,90	165,48	39
28	3,97	95,17	5,74	137,84	45
29	2,13	51,12	2,22	53,35	4
30	3,11	74,65	3,67	88,16	18
<b><math>\Sigma</math> E(fixo)</b>	<b>2010,09</b>	<b><math>\Sigma</math> E(móvel)</b>	<b>2877,21</b>	<b>43</b>	

Na Figura 5.8 pode ver-se a produção de energia de ambos os painéis fotovoltaicos entre os meses de agosto e novembro de 2011. No mês de agosto o sistema móvel produziu mais 49% do que o sistema fixo. Como em agosto apenas há registo de cerca de metade do mês, com os dados disponíveis fez-se uma estimativa para o mês completo. No mês de setembro o sistema móvel produziu mais 49% do que o sistema fixo, em outubro esse valor subiu para 57% e em novembro foi de 43%. Na média destes três meses o sistema móvel conseguiu produzir cerca de 50% a mais de energia em relação ao sistema fixo. Em outubro houve mais dias de sol do que nos meses de setembro e novembro, o que fez com que no mês de outubro o aumento da produção do sistema móvel em relação ao fixo fosse percentualmente superior ao ocorrido para os outros três meses de que há registo neste trabalho.

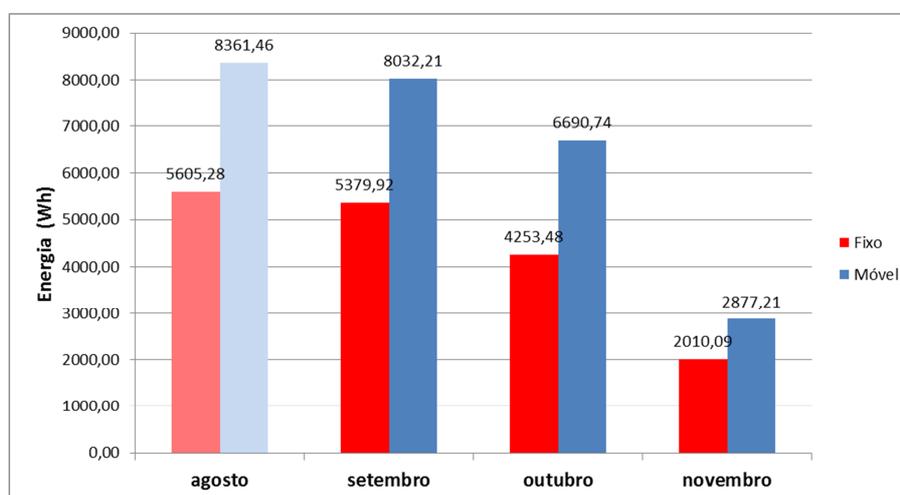


Figura 5.8 – Produção de energia elétrica dos painéis fotovoltaicos fixo e móvel nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro de 2011.

## 5.4. Análise Financeira

Nesta secção é feita uma análise financeira com base em dados de uma empresa para um sistema fotovoltaico de 4,6 kW, assim como uma análise com base em dados estimados a partir de uma ferramenta de simulação, para um sistema de 200 W. Note-se que se pretende essencialmente comparar se é vantajoso adquirir um sistema solar fotovoltaico móvel em vez de um sistema fixo, e não analisar o retorno do investimento.

### 5.4.1. Sistema de 4,6 kW

De seguida é feita a comparação da viabilidade económica de um sistema solar fotovoltaico fixo com um sistema solar fotovoltaico móvel de dois eixos, baseada em dados da empresa *Vimasol Energias Renováveis*. Os dados de produção de energia de um sistema de 4,6 kW, com painéis fotovoltaicos de Silício cristalino, correspondem a

estimativas. Estas estimativas para o sistema fixo têm em conta que o painel fotovoltaico tem uma inclinação de 35° com azimute de 0°. Foi admitido uma perda de rendimento do sistema de 0,75% por cada ano de funcionamento. A partir do ano 16 a tarifa de venda é uma estimativa do preço da energia para essa altura. O custo do sistema fixo é de 12 990 € enquanto o do sistema móvel é de 19 650 €.

Na Tabela 5.6 e na Tabela 5.7 é apresentada a energia que se espera produzir ao longo de 20 anos pelo sistema fixo e pelo sistema móvel, e os ganhos com a venda da energia para a rede elétrica.

Pode ver-se que o sistema fixo tem um retorno do investimento a partir do ano 8, enquanto o sistema móvel tem um retorno do seu investimento a partir do ano 10.

Ao fim de 20 anos espera-se ganhar com o sistema móvel 9 212,86 € a mais do que com o sistema fixo, contudo o sistema móvel é 6 660,00 € mais caro do que o fixo. Deste modo, o sistema móvel só começa a compensar em relação ao sistema fixo a partir do ano 15. Ao fim dos 20 anos espera-se que o sistema móvel renda mais 2 552,86 € do que o sistema fixo.

Os cálculos das Tabelas 5.6, 5.7, 5.10 e 5.11 são feitos com base nas expressões (5.1), (5.2) e (5.3) apresentadas a seguir:

$$Total = Tarifa \times Produ\c{c}\tilde{a}o \quad (5.1)$$

$$Vendas\ acumuladas\ ano_{(n)} = Total\ ano_{(n)} + Vendas\ acumuladas\ ano_{(n-1)} \quad (5.2)$$

$$Fluxo\ de\ caixa\ acumulado\ ano_{(1)} = Vendas\ acumuladas\ ano_{(1)} - Custo\ inicial\ equipamento \quad (5.3)$$

$$Fluxo\ de\ caixa\ acumulado\ ano_{(n)} = Fluxo\ de\ caixa\ acumulado\ ano_{(n-1)} + Total\ ano_{(n)} \quad (5.4)$$

Tabela 5.6 – Estudo da viabilidade económica para um sistema solar fotovoltaico fixo de 4,6 kW de potência (a partir de dados estimados).

<b>Ano</b>	<b>Tarifa (€/kWh)</b>	<b>Produção (kWh)</b>	<b>Total (€)</b>	<b>Vendas Acumuladas (€)</b>	<b>Fluxo de Caixa Acumulado (€)</b>
Ano 1	0,272	6348	1726,66	1726,66	-11263,34
Ano 2	0,272	6300	1713,71	3440,36	-9549,64
Ano 3	0,272	6253	1700,85	5141,22	-7848,78
Ano 4	0,272	6206	1688,10	6829,31	-6160,69
Ano 5	0,272	6160	1675,44	8504,75	-4485,25
Ano 6	0,272	6113	1662,87	10167,62	-2822,38
Ano 7	0,272	6068	1650,40	11818,02	-1171,98
Ano 8	0,272	6022	1638,02	13456,04	466,04
Ano 9	0,150	5977	896,55	14352,58	1362,58
Ano 10	0,150	5932	889,82	15242,41	2252,41
Ano 11	0,150	5888	883,15	16125,55	3135,55
Ano 12	0,150	5843	876,52	17002,08	4012,08
Ano 13	0,150	5800	869,95	17872,03	4882,03
Ano 14	0,150	5756	863,43	18735,45	5745,45
Ano 15	0,150	5713	856,95	19592,40	6602,40
Ano 16	0,220	5670	1247,43	20839,84	7849,84
Ano 17	0,231	5628	1299,98	22139,82	9149,82
Ano 18	0,243	5585	1357,26	23497,07	10507,07
Ano 19	0,255	5544	1413,60	24910,67	11920,67
Ano 20	0,267	5502	1469,02	26379,69	13389,69

Tabela 5.7 – Estudo da viabilidade económica para o sistema solar fotovoltaico móvel de dois eixos de 4,6 kW de potência (a partir de dados estimados).

Ano	Tarifa €/kWh	Produção kWh	Total €	Vendas Acumuladas (€)	Fluxo de Caixa Acumulado (€)
Ano 1	0,272	8565	2329,68	2329,68	-17320,32
Ano 2	0,272	8501	2312,27	4641,952	-15008,05
Ano 3	0,272	8437	2294,86	6936,816	-12713,18
Ano 4	0,272	8374	2277,73	9214,544	-10435,46
Ano 5	0,272	8311	2260,59	11475,136	-8174,86
Ano 6	0,272	8249	2243,73	13718,864	-5931,14
Ano 7	0,272	8187	2226,86	15945,728	-3704,27
Ano 8	0,272	8125	2210,00	18155,728	-1494,27
Ano 9	0,150	8064	1209,60	19365,328	-284,67
Ano 10	0,150	8004	1200,60	20565,928	915,93
Ano 11	0,150	7944	1191,60	21757,528	2107,53
Ano 12	0,150	7884	1182,60	22940,128	3290,13
Ano 13	0,150	7825	1173,75	24113,878	4463,88
Ano 14	0,150	7766	1164,90	25278,778	5628,78
Ano 15	0,150	7708	1156,20	26434,978	6784,98
Ano 16	0,220	7650	1683,00	28117,978	8467,98
Ano 17	0,231	7593	1753,98	29871,961	10221,96
Ano 18	0,243	7536	1831,25	31703,209	12053,21
Ano 19	0,255	7480	1907,40	33610,609	13960,61
Ano 20	0,267	7423	1981,94	35592,55	15942,55

#### 5.4.1. Sistema de 200 W

O estudo apresentado nesta dissertação foi feito com apenas um painel fotovoltaico de 50 W no sistema fixo e no sistema móvel. Contudo, a estrutura do seguidor solar utilizado no sistema móvel pode ter até quatro painéis fotovoltaicos de 50 W. Dessa forma, com quatro painéis fotovoltaicos a energia produzida pelo conjunto será quatro vezes maior do que a produzida por apenas um painel de 50 W.

A análise aqui feita só terá em conta a vida útil do seguidor solar fotovoltaico, uma vez que apenas se pretende comparar se vale a pena optar por um sistema móvel ou fixo. Nesta análise não é tida em conta a diminuição do rendimento dos painéis ao longo dos anos, nem os custos de manutenção do sistema.

O tempo estimado de vida útil do seguidor solar utilizado neste estudo é de 10 anos e teve um custo de 299,84 €. Assim o sistema móvel só será vantajoso quando a diferença entre os ganhos de produção de energia do sistema móvel e do sistema fixo for superior a este valor. O tempo estimado de vida útil dos painéis fotovoltaicos é de 25 anos e o seu custo é de 197,75 €.

Como os dados adquiridos neste trabalho não são suficientes para se fazer uma análise rigorosa da viabilidade económica do sistema, serão usados dados obtidos no sítio *Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps* [61] (ver Tabela 5.8).

Tabela 5.8 – Energia produzida por mês, em kWh, por um sistema solar fotovoltaico fixo e móvel de um eixo com potência de 200 W, com uma inclinação de 25°, para Vila Nova de Famalicão.

<b>Sistema Fixo</b>		<b>Sistema móvel de 1 eixo</b>	
<b>Mês</b>	<b>E (kWh)</b>	<b>Mês</b>	<b>E (kWh)</b>
Jan.	14,3	Jan.	17,7
Fev.	14,9	Fev.	18,2
Mar.	23,5	Mar.	30,7
Abr.	23,7	Abr.	31
Mai.	27,5	Mai.	36,8
Jun.	28,8	Jun.	40,2
Jul.	29,3	Jul.	40,3
Ago.	29,5	Ago.	40,6
Set.	24,7	Set.	32,7
Out.	19,9	Out.	25,2
Nov.	13,8	Nov.	16,9
Dez.	11,3	Dez.	13,4
<b>Média Mensal</b>	<b>21,8</b>	<b>Média Mensal</b>	<b>28,7</b>
<b>Total do Ano</b>	<b>261,2</b>	<b>Total do Ano</b>	<b>343,7</b>

A análise financeira será feita para o regime geral e para o regime bonificado de venda de energia. No regime geral, o valor da energia produzida é igual ao preço de compra ao fornecedor de eletricidade, que neste caso será de 0,1155 €/kWh. As tarifas no regime bonificado são apresentadas na tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Preço da energia solar no regime bonificado em 2012 [60].

<b>Regime Bonificado</b> <b>(Preço por kWh)</b>	
Primeiros 8 anos	0,326
7 anos seguintes	0,185€

Nas Tabelas 5.10 e 5.11 são apresentados os ganhos na venda da energia elétrica, que se espera obter, no regime geral e no regime bonificado, para o sistema fixo e para o sistema móvel de um eixo, ambos de 200 W, num período de 15 anos, que corresponde ao período de tempo em que se prevê a continuação da existência de venda de energia em regime bonificado. Pode ver-se que no regime geral de venda de energia, tanto para

o sistema fixo como para o sistema móvel, num período de 15 anos, não há retorno do investimento.

Tabela 5.10 – Estudo financeiro para um sistema fotovoltaico fixo de 200 W de potência.

Ano	Produção (kWh)	Regime Geral		Regime Bonificado	
		Total (€)	Vendas Acumuladas (€)	Total (€)	Vendas Acumuladas (€)
Ano 1	261,2	30,17	30,17	85,15	85,15
Ano 2	261,2	30,17	60,34	85,15	170,30
Ano 3	261,2	30,17	90,51	85,15	255,45
Ano 4	261,2	30,17	120,67	85,15	340,60
Ano 5	261,2	30,17	150,84	85,15	425,76
Ano 6	261,2	30,17	181,01	85,15	510,91
Ano 7	261,2	30,17	211,18	85,15	596,06
Ano 8	261,2	30,17	241,35	85,15	681,21
Ano 9	261,2	30,17	271,52	48,32	729,53
Ano 10	261,2	30,17	301,69	48,32	777,85
Ano 11	261,2	30,17	331,85	48,32	826,18
Ano 12	261,2	30,17	362,02	48,32	874,50
Ano 13	261,2	30,17	392,19	48,32	922,82
Ano 14	261,2	30,17	422,36	48,32	971,14
Ano 15	261,2	30,17	452,53	48,32	1019,46

Tabela 5.11 – Estudo financeiro para um sistema fotovoltaico móvel de um eixo de 200 W de potência.

Ano	Produção (kWh)	Regime Geral		Regime Bonificado	
		Total (€)	Vendas Acumuladas (€)	Total (€)	Vendas Acumuladas (€)
Ano 1	343,7	39,70	39,70	112,05	112,05
Ano 2	343,7	39,70	79,39	112,05	224,09
Ano 3	343,7	39,70	119,09	112,05	336,14
Ano 4	343,7	39,70	158,79	112,05	448,18
Ano 5	343,7	39,70	198,49	112,05	560,23
Ano 6	343,7	39,70	238,18	112,05	672,28
Ano 7	343,7	39,70	277,88	112,05	784,32
Ano 8	343,7	39,70	317,58	112,05	896,37
Ano 9	343,7	39,70	357,28	63,58	959,95
Ano 10	343,7	39,70	396,97	63,58	1023,54
Ano 11	343,7	39,70	436,67	63,58	1087,12
Ano 12	343,7	39,70	476,37	63,58	1150,71
Ano 13	343,7	39,70	516,07	63,58	1214,29
Ano 14	343,7	39,70	555,76	63,58	1277,88
Ano 15	343,7	39,70	595,46	63,58	1341,46

Na Tabela 5.12, são apresentados os ganhos de um sistema móvel de um eixo de 200 W em relação a um sistema fixo de 200 W num período de 15 anos. Pode verificar-se que considerando o tempo de vida útil do seguidor solar, 10 anos, não é vantajoso adquirir um sistema móvel. Só seria proveitoso se o custo do seguidor fosse inferior a 245,69 €, ou se o tempo de vida útil que o fabricante estima para o seguidor solar fosse superior a 10 anos. Verifica-se que o sistema móvel só começaria a ser mais proveitoso, em relação ao sistema fixo, a partir do ano 14.

Tabela 5.12 – Ganhos de um sistema solar fotovoltaico móvel de 200 W em relação a um sistema fixo de 200 W no regime bonificado

	<b>Sistema Fixo</b>	<b>Sistema Móvel</b>	<b>Ganhos acumulados do sistema móvel em relação ao sistema fixo (€)</b>
<b>Ano</b>	<b>Vendas Acumuladas (€)</b>	<b>Vendas Acumuladas (€)</b>	
Ano 1	85,15	112,05	26,90
Ano 2	170,30	224,09	53,79
Ano 3	255,45	336,14	80,69
Ano 4	340,60	448,18	107,58
Ano 5	425,76	560,23	134,47
Ano 6	510,91	672,28	161,37
Ano 7	596,06	784,32	188,26
Ano 8	681,21	896,37	215,16
Ano 9	729,53	959,95	230,42
Ano 10	777,85	1023,54	245,69
Ano 11	826,18	1087,12	260,94
Ano 12	874,50	1150,71	276,21
Ano 13	922,82	1214,29	291,47
Ano 14	971,14	1277,88	306,74
Ano 15	1019,46	1341,46	322,00

## 5.4. Conclusões

Neste capítulo, através dos resultados experimentais, validaram-se os dados do fabricante do seguidor solar usado neste trabalho, que refere que o aumento de produção em relação a um sistema fixo, num dia de sol não totalmente limpo, pode chegar aos 60%.

Também verificou-se que existe uma situação em que o painel fotovoltaico móvel produz ainda mais do que o painel fotovoltaico fixo. Essa situação acontece num dia em que o sol começa a aparecer mais ao final da tarde ou quando aparece só no início da manhã. Como o painel fotovoltaico móvel já produz de forma significativa a essas

horas, uma vez que capta mais horas de sol, isso vai implicar em que a sua produção vai ser muito superior a um painel fotovoltaico fixo.

A partir dos resultados apresentados neste capítulo também se pode concluir que para saber se um sistema móvel é mais vantajoso em termos económicos do que um fixo, isso vai depender de algumas variáveis, tais como o preço do kWh, o preço do sistema seguidor solar, a potência do sistema fotovoltaico e do tempo de vida útil do equipamento.

Relativamente à análise financeira apresentada neste capítulo, constatou-se que, tanto um sistema fotovoltaico de 4,6 kW como um sistema fotovoltaico de 200 W começam a compensar por volta do ano 14 ou 15 no regime bonificado. Também se pode concluir que o sistema de 4,6 kW é mais profícuo, apesar do investimento ser maior.

# CAPÍTULO 6

## Conclusão e Trabalho Futuro

### 6.1. Conclusões

Com este trabalho pretendeu-se fazer um estudo comparativo entre a produção de um painel fotovoltaico fixo e um móvel. Essa comparação foi feita através dos resultados obtidos, medidos através de um sistema de monitorização desenvolvido para este fim.

No Capítulo 2 foram explicados conceitos relativos aos movimentos da Terra, coordenadas geográficas, unidades de medida de tempo, ângulos solares, radiação solar e orientação dos painéis fotovoltaicos.

No Capítulo 3 descreveram-se os tipos de sistemas fotovoltaicos, o tipo de células fotovoltaicas e seu funcionamento. Também foram descritos os parâmetros de um painel fotovoltaico, assim como os efeitos do sombreamento, do vento e da temperatura no rendimento dos mesmos. Foram ainda referidos os sistemas de seguimento de sol e quais os parâmetros a ter em conta na escolha de um seguidor solar.

No Capítulo 4 foi explicado como se implementou o sistema de monitorização, descrevendo os equipamentos usados e as montagens efetuadas. Também se explicou o programa desenvolvido para o sistema de monitorização. Foram ainda apresentados os custos dos equipamentos utilizados na realização deste trabalho.

No Capítulo 5 foram apresentados os resultados experimentais registados, através dos quais se pôde comparar a produção do painel fotovoltaico fixo com a do painel fotovoltaico móvel. Verificou-se que a produção de um painel fotovoltaico com seguidor solar, em dias de sol ou pouco nublados é bastante superior à do painel fotovoltaico fixo.

Constatou-se também que existe uma situação em que o painel fotovoltaico móvel produz ainda muito mais do que o painel fotovoltaico fixo. Esta situação acontece num dia em que o sol aparece somente no início da manhã, ou num dia em que aparece apenas no final da tarde, ou mesmo quando ocorram ambas as situações. Como o painel fotovoltaico móvel começa a produzir de forma significativa mais cedo do que o fixo, e

se mantém a produzir até mais tarde, este capta mais horas de sol, em particular nestas situações, implicando numa produção muito superior à de um painel fotovoltaico fixo.

Para saber se o sistema móvel é mais profícuo do que o fixo tem de se realizar um estudo financeiro, que dependerá de algumas variáveis, tais como o preço do kWh, o preço do sistema móvel, a potência do sistema fotovoltaico e o tempo de vida útil dos equipamentos utilizados.

De uma forma geral, pode-se afirmar que os objetivos do trabalho foram atingidos, pois o sistema de monitorização foi desenvolvido, utilizado e validado, e os painéis solares fotovoltaicos fixo e móvel foram montados, conseguindo obter-se dados para comparar a produção de um sistema móvel de um eixo em relação à de um sistema fixo, confirmando-se a maior produção de energia assegurada pelo sistema móvel.

## **6.2. Sugestões para Trabalho Futuro**

De seguida são apresentadas algumas sugestões para trabalho futuro, a ser desenvolvido no seguimento do trabalho apresentado nesta Dissertação de Mestrado:

- A radiação solar ao longo do ano varia de ano para ano, podendo existir anos mais chuvosos e outros em que há mais sol. Logo para se fazer um estudo mais aprofundado das diferenças entre um painel fotovoltaico fixo e um móvel teria de se continuar com a monitorização das tensões e correntes de ambos os painéis.
- Outra sugestão é a medição da radiação solar e a utilização de um circuito MPPT para extrair a máxima potência dos painéis, podendo desta forma verificar-se o rendimento dos painéis solares fotovoltaicos.
- O rendimento dos painéis é afetado por variáveis ambientais tais como a temperatura e o vento, portanto seria interessante efetuar medições e registo destas duas variáveis ao longo do dia, para verificar até que ponto estes parâmetros afetam o rendimento dos painéis fotovoltaicos.
- Seria também interessante realizar um levantamento dos custos de manutenção dos sistemas solares fotovoltaicos móveis e fixos para uma análise financeira mais aprofundada.

## Referências

- [1] “Photovoltaic Education Network.” [Online]. Disponível:  
<http://pveducation.org/pvedrom/manufacturing/first-photovoltaic-devices#ref7>.  
[Acedido: 13-Nov-2011].
- [2] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [3] “National Renewable Energy Laboratory. History of Solar Cells: Grades 9-12.” [Online]. Disponível: [http://www.nrel.gov/education/educational\\_resources.html](http://www.nrel.gov/education/educational_resources.html). [Acedido: 13-Nov-2011].
- [4] “Solar Star Technologies - History of PV Solar” [Online]. Disponível:  
<http://solarstartechnologies.com/id69.html>. [Acedido: 13-Nov-2011].
- [5] “Naval Research Laboratory Vanguard Project.” [Online]. Disponível:  
<http://www.nrl.navy.mil/accomplishments/rockets/vanguard-project>.  
[Acedido: 13-Set-2012].
- [6] J. Nelson, *The Physics Of Solar Cells*. Imperial College Press, 2003.
- [7] J. Morais, *Sistemas Fotovoltaicos da Teoria à Prática*. Engebook, 2009.
- [8] “Map Energy Indicators.” [Online]. Disponível: <http://www.iea.org/country/maps.asp>.  
[Acedido: 14-Nov-2011].
- [9] “Consumo de energia elétrica *per capita*: total e por tipo de consumo – Portugal.” [Online]. Disponível: <http://www.pordata.pt>. [Acedido: 6-Set-2012].
- [10] “Key World Energy Statistics.” [Online]. Disponível:  
[http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key\\_world\\_energy\\_stats-1.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key_world_energy_stats-1.pdf). [Acedido: 10-Set-2012].
- [11] “Global Warming.com – Sustainable Earth - Sustainable Future.” [Online]. Disponível:  
<http://globalwarming.com/2009/03/causes-of-global-warming>. [Acedido: 6-Set-2012].
- [12] “United States Environmental Protection Agency (EPA).” [Online]. Disponível:  
<http://www.epa.gov/climatechange/basics>. [Acedido: 6-Set-2012].
- [13] “National Geographic”. [Online]. Disponível:  
<http://environment.nationalgeographic.com/environment/global-warming>. [Acedido: 6-Set-2012].
- [14] “CO<sub>2</sub> Emissions From Fuel Combustion Highlights.” [Online]. Disponível:  
<http://iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf>. [Acedido: 14-Nov-2011].

- [15] “Estatísticas - Energia Elétrica, Produção/Consumos (1994 a 2010).” [Online]. Disponível: <http://www.dgeg.pt>. [Acedido: 14-Out-2012].
- [16] “Estatísticas – Potência Instalada nas Centrais Produtoras de Energia Elétrica.” [Online]. Disponível: <http://www.dgge.pt>. [Acedido: 20-Out-2012].
- [17] “Renováveis na hora – Estatísticas Microprodução.” [Online]. Disponível: <http://www.renovaveisnahora.pt/web/srm/estatisticas1>. [Acedido: 20-Out-2012].
- [18] “Publicações – Energias Renováveis em Portugal (2007).” [Online]. Disponível: <http://www.dgge.pt>. [Acedido: 14-Nov-2011].
- [19] “Apresentação: *Serpa Solar Plant* Eng. Piero Dal Maso – CATAVENTO.” [Online]. Disponível: <http://www.c3p.org/workshop2007.htm>. [Acedido: 14-Nov-2011].
- [20] “Portal de Energias Renováveis” [Online]. Disponível: <http://www.portal-energia.com>. [Acedido: 14-Nov-2011].
- [21] V. M. Fthenakis, H. C. Kim, and E. Alsema, “Emissions from Photovoltaic Life Cycles,” *Environmental science technology*, pp. 2168–2174, 2008.
- [22] “REN.” [Online]. Disponível: <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoExploracao/Paginas/DiagramadeCargadaRNT.aspx>. [Acedido: 8-Dez-2011].
- [23] “REN.” [Online]. Disponível: <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoExploracao/Paginas/EstatisticaDiariaDiagrama.aspx>. [Acedido: 2-Dez-2011].
- [24] “Maps of Global horizontal irradiation.” [Online]. Disponível: <http://solargis.info/doc/71>. [Acedido: 18-Nov-2011].
- [25] “Mecasolar - State-of-the-art solar trackers for photovoltaic solar plants - Design, manufacture and distribution.” [Online]. Disponível: <http://www.mecasolar.com>. [Acedido: 1-Out-2010].
- [26] “Grupo Eco Power.” [Online]. Disponível: <http://www.ecopower.pt>. [Acedido: 1-Out-2010].
- [27] M. Ferreira e G. Almeida, *Introdução à Astronomia e às Observações Astronómicas*, 7<sup>a</sup> Edição. Lisboa: Plátano Editora, 2004.
- [28] K. Sousa Oliveira e Filho e M. de F. Oliveira Saraiva, *Astronomia e Astrofísica*, Departamento de Astronomia. Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul Brasil, 2003.

- [29] “Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS.” [Online]. Disponível: <http://astro.if.ufrgs.br/esf.htm>. [Acedido: 8-Set-2012].
- [30] A. Pires Miguens, *Navegação: A ciência e a Arte*, Volume II *Navegação Astronómica e Derrotas*.
- [31] “Ciência Viva.” [Online]. Disponível: <http://www.cienciaviva.pt/latlong/anterior/gps.asp>. [Acedido: 7-Fev-2012].
- [32] “Calculs Astronomiques – Applications.” [Online]. Disponível: <http://cleyo.free.fr/satellite/reperage.php>. [Acedido: 7-Fev-2012].
- [33] “Ram-Air Skyways.” [Online]. Disponível: [http://www.ramairskyways.com/HTML/Time\\_Local\\_UTC.html](http://www.ramairskyways.com/HTML/Time_Local_UTC.html). [Acedido: 7-Set-2012].
- [34] Soteris A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press, 2009.
- [35] “Énergie +, Théories – L’ensoleillement.” [Online]. Disponível: <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16759>. [Acedido: 1-Set-2012].
- [36] António F. O. Falcão, *Energia Solar – Movimento e posicionamento relativos Terra- Sol*. Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico, 2008.
- [37] “Heliotec.” [Online]. Disponível: <http://www.heliodon.com.br/imagens.html>. [Acedido: 5-Set-2012].
- [38] “Energia Fotovoltaica manual sobre tecnologias projecto e instalação.” [Online]. Disponível: <http://www.electronica-pt.com>. [Acedido: 1-Out-2010].
- [39] “Definição de albedo.” [Online]. Disponível: <http://www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php/Albedo>. [Acedido: 7-Fev-2012].
- [40] “ESA – European Space Agency – Página Web com descrição do satélite meteorológico METEOSAT.” [Online]. Disponível: [http://www.esa.int/esaMI/Eduspace\\_PT/SEMNA65P1G\\_2.html](http://www.esa.int/esaMI/Eduspace_PT/SEMNA65P1G_2.html). [Acedido: 7-Fev-2012].
- [41] “Solarlux.” [Online]. Disponível: <http://www.eyesolarlux.com/Solar-simulation-energy.htm>. [Acedido: 1-Set-2012].
- [42] “Instituto de Astronomia, Geofísica, e Ciências Atmosféricas.” [Online]. Disponível: [http://www.dca.iag.usp.br/www/material/akemi/fisicaII/apostila\\_cap\\_04.pdf](http://www.dca.iag.usp.br/www/material/akemi/fisicaII/apostila_cap_04.pdf). [Acedido: 17-Set-2012].

- [43] “Instituto de Meteorologia.” [Online]. Disponível:  
<http://www.meteo.pt/pt/enciclopedia/geomagnetismo/index.html>.  
[Acedido: 20-Set-2012].
- [44] “Donauer.” [Online]. Disponível:  
<http://www.donauer.eu/pt/areas-de-negocio/sistemas-fotovoltaicos/sistemas-isolados/sistemas-hibridos>. [Acedido: 24-Set-2012].
- [45] “Sonigate.” [Online]. Disponível: <http://www.sonigate.com>.  
[Acedido: 25-Set-2012].
- [46] “EPIA, Énergie Photovoltaïque, L’énergie du Soleil.” [Online]. Disponível:  
<http://www.epia.org/publications/epiapublications.html>. [Acedido: 15-Set-2012].
- [47] “EPIA, PV.” [Online]. Disponível:  
<http://www.epia.org/solar-pv/pv-technologies-cells-and-modules.html>.  
[Acedido: 15-Set-2012].
- [48] “Solar Cells and Nanostructured Devices Laboratory.” [Online]. Disponível:  
<http://sunlab.site.uottawa.ca/pdf/whitepapers/HiEfficMjSc-CurrStatus&FuturePotential.pdf>. [Acedido: 15-Set-2012].
- [49] “SolarElectNord.” [Online]. Disponível: <http://www.solarelectnord.com/differentes-cellules-photovoltaiques-solarelectnord-pas-de-calais-nord-59-62.html>.  
[Acedido: 19-Set-2012].
- [50] “BlueSol Educacional Energia Solar.” [Online]. Disponível:  
<http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-tipos-de-celulas-fotovoltaicas>. [Acedido: 19-Set-2012].
- [51] “eF4 Énergie Facteur 4.” [Online]. Disponível:  
<http://www.ef4.be/fr/photovoltaique/aspects-techniques/celules-photovoltaiques.html>.  
[Acedido: 19-Set-2012].
- [52] Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa and Wilhelm Warta, “Solar cell efficiency tables (version 39)”, Progress in Photovoltaics: Research and Applications
- [53] “BECA SPRL – Bureau d’Études Entreprise de Transformation et Rénovation.” [Online]. Disponível: <http://users.skynet.be/becasprl/photovoltaique.html>. [Acedido: 19-Set-2012].
- [54] A. P. Malvino, *Princípios de Electrónica 1*, 6ª Edição. Mc Graw-Hill, 2000.
- [55] “Energia Solar - Princípios e Aplicações - Cresesb- Cepel.” [Online]. Disponível:  
[www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_solar\\_2006.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf).  
[Acedido: 19-Set-2012].

- [56] “Solar-Wind.” [Online]. Disponível: [http://www.shop.solar-wind.co.uk/acatalog/et\\_solar\\_pv\\_panels.html](http://www.shop.solar-wind.co.uk/acatalog/et_solar_pv_panels.html). [Acedido: 27-Set-2012].
- [57] “Sat Control.” [Online]. Disponível: <http://www.solar-motors.com>. [Acedido: 18-Nov-2011].
- [58] LEM “datasheetCKRS 6-NP.”
- [59] “Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps” [Online]. Disponível: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php#>. [Acedido: 27-Jun-2011]
- [60] “Microgeração EDP.” [Online]. Disponível: <http://www.microgeracaoedp.com/venda-a-energia-que-produz>. [Acedido: 10-Set-2012].
- [61] “Joint Research Centre – Institute for Energy and Transport.” [Online]. Disponível: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>. [Acedido: 10-Out-2012].

# APÊNDICE 1

Produção dos painéis solares fotovoltaicos ao longo do dia, de 28 a 31 de julho, de 1 a 16 de agosto e nos meses de setembro, outubro e novembro de 2011.

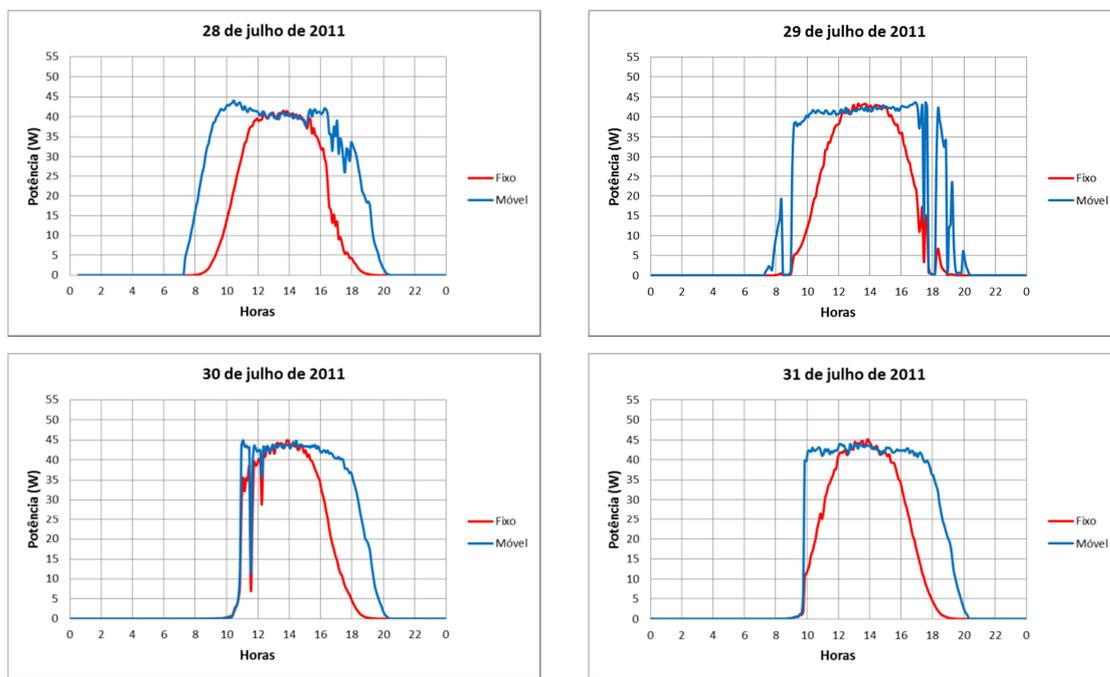


Figura A1.1 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 28 a 31 de julho de 2011.

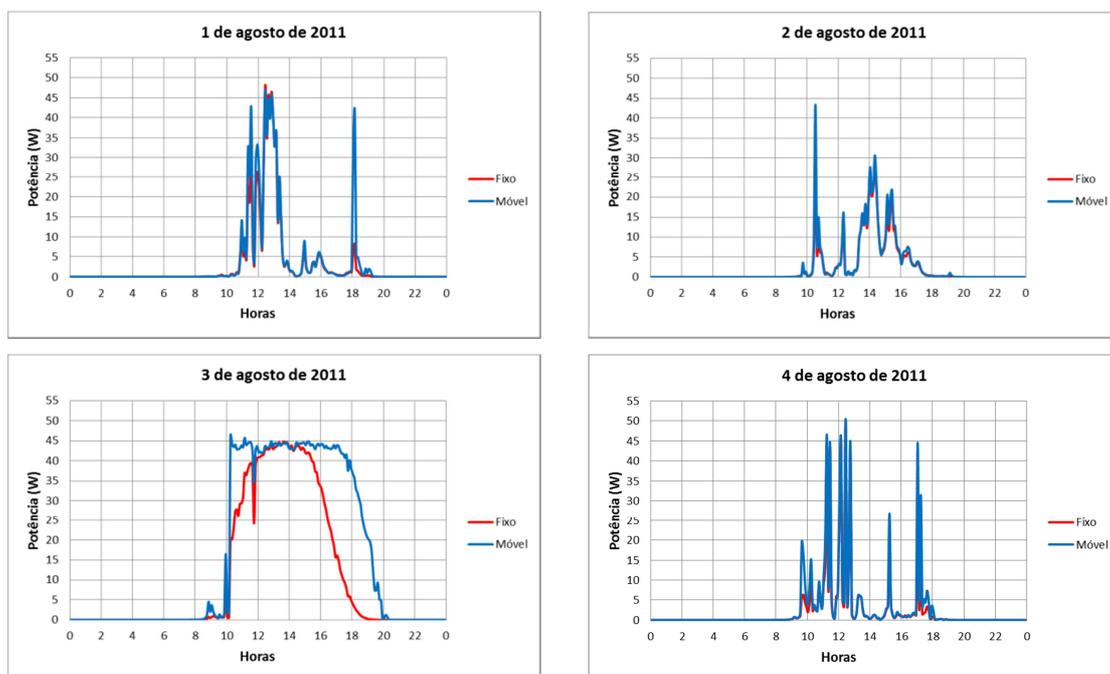


Figura A1.2 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 1 a 4 de agosto de 2011.

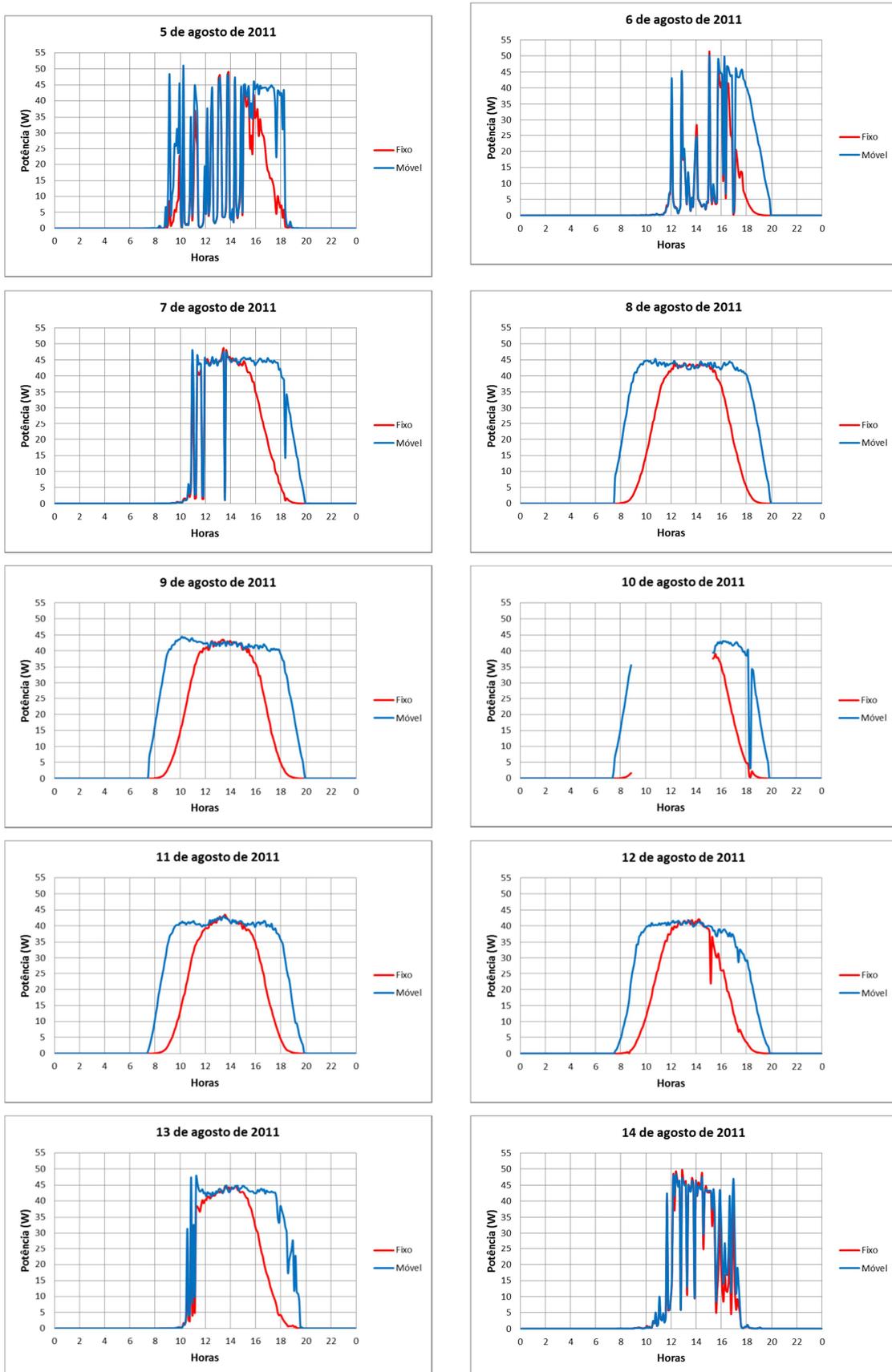


Figura A1.3 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 5 a 14 de agosto de 2011.

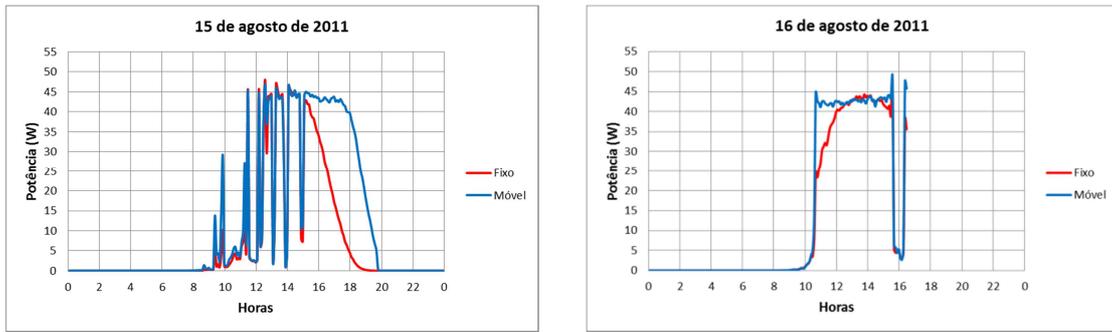


Figura A1.4 – Produção dos painéis fotovoltaicos ao longo do dia, de 15 a 16 de agosto de 2011.

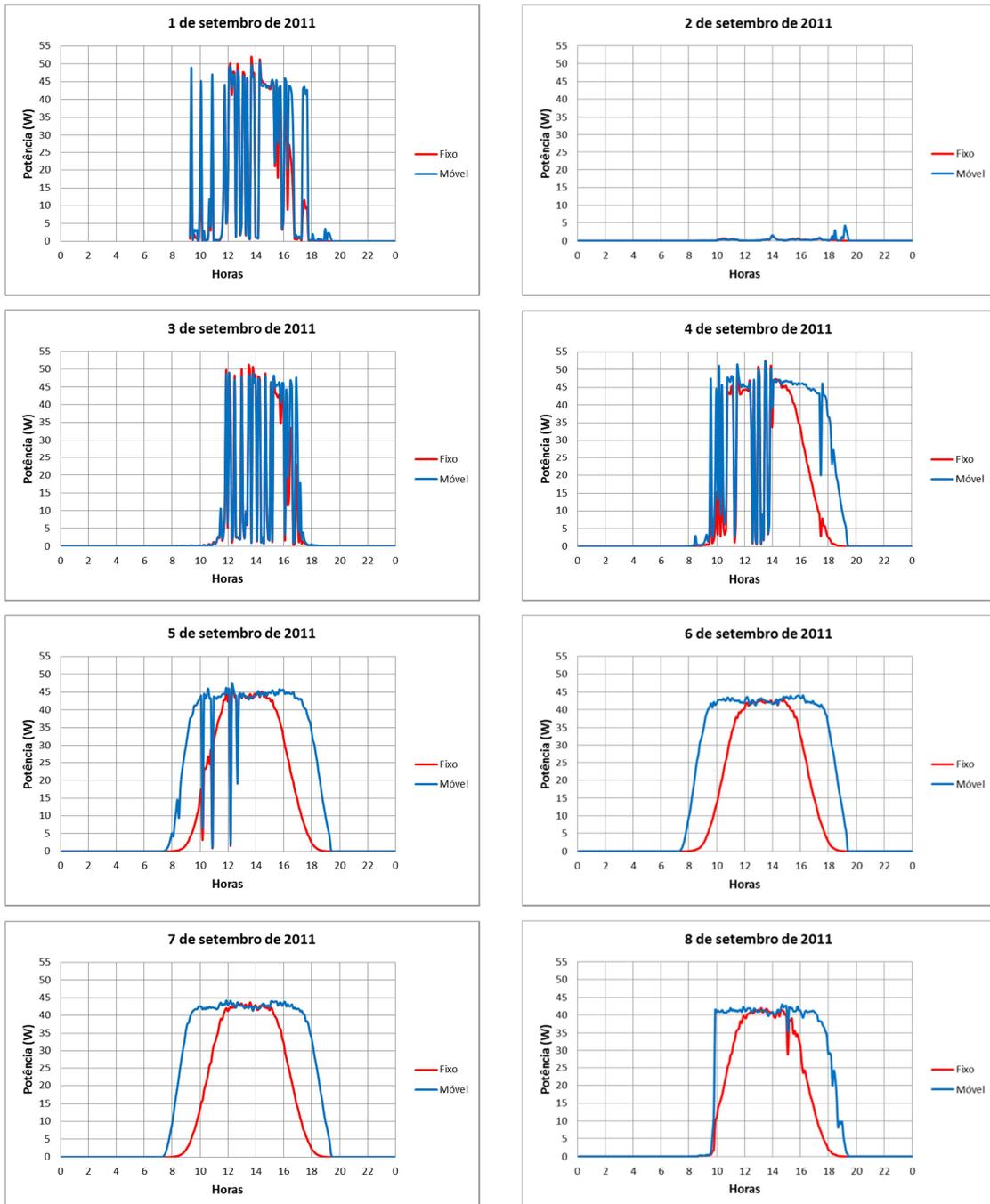


Figura A1.5 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 1 a 8 de setembro de 2011.

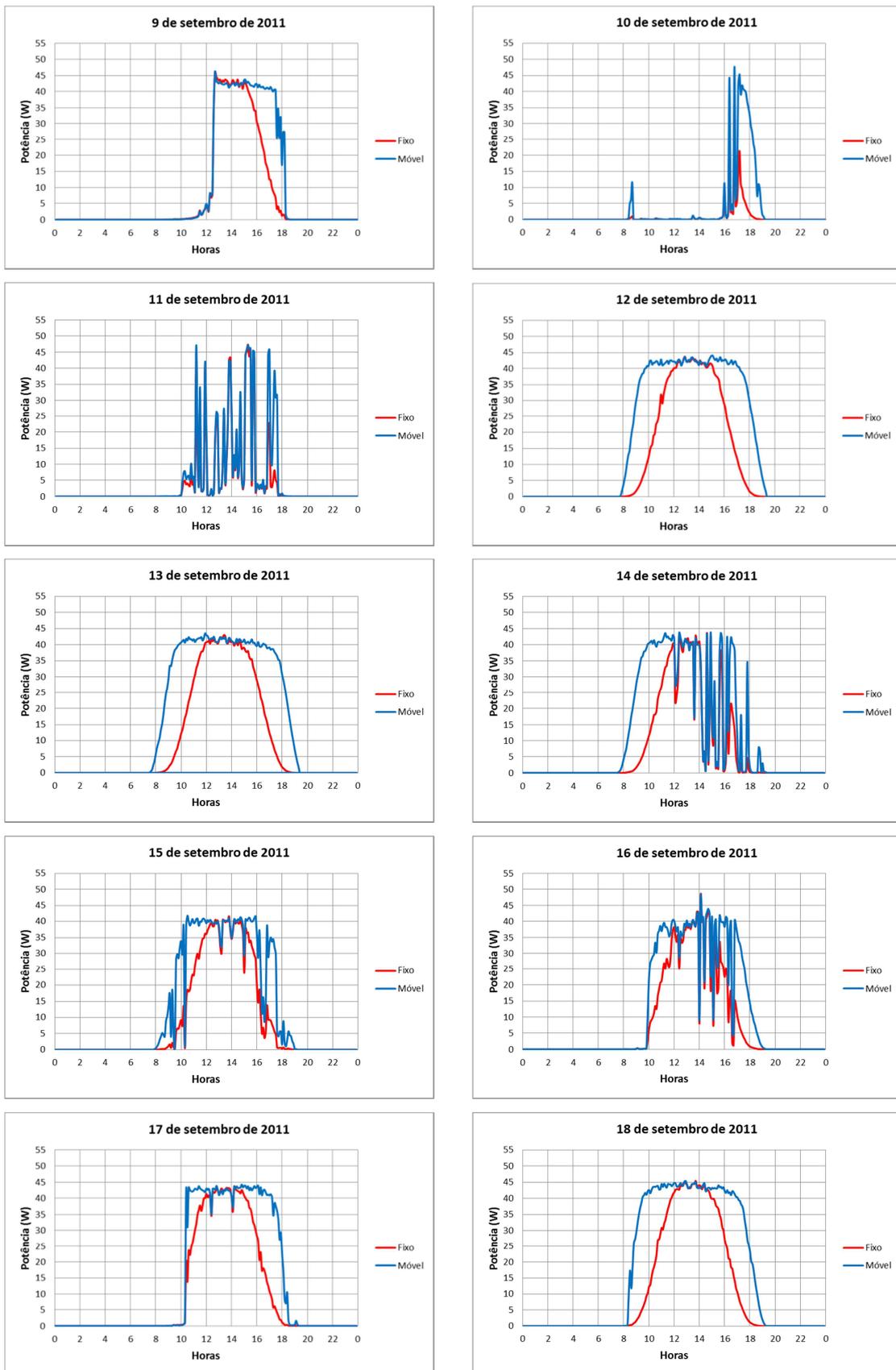


Figura A1.6 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 9 a 18 de setembro de 2011.

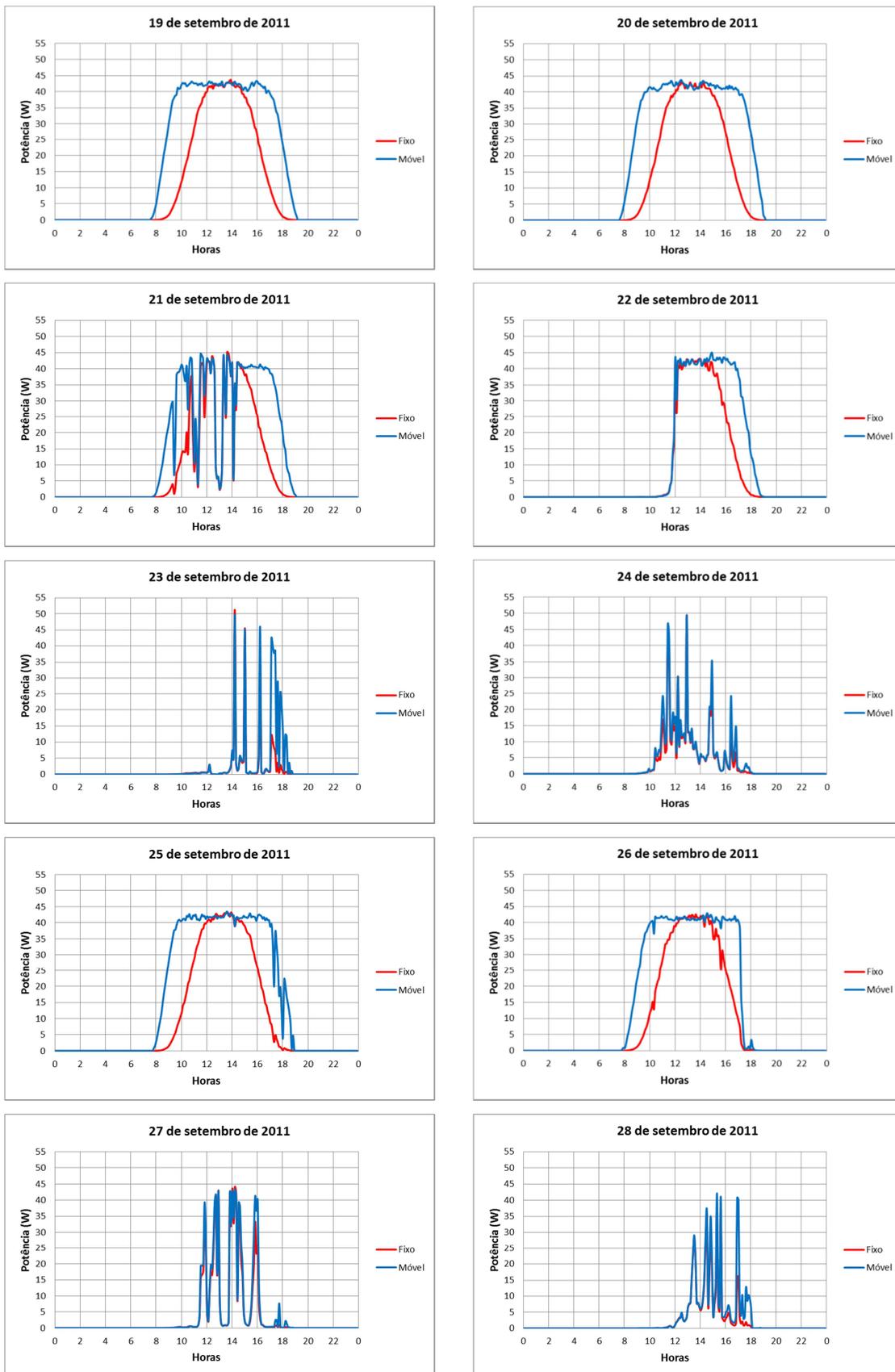


Figura A1.7 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 19 a 28 de setembro de 2011.

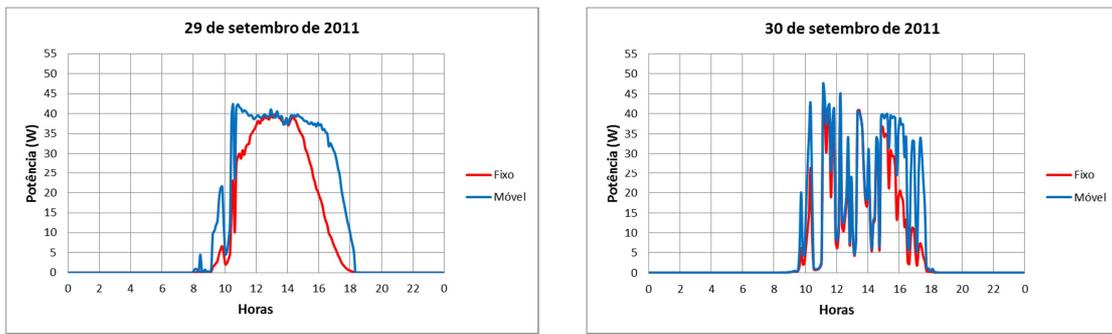


Figura A1.8 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 29 a 30 de setembro de 2011.

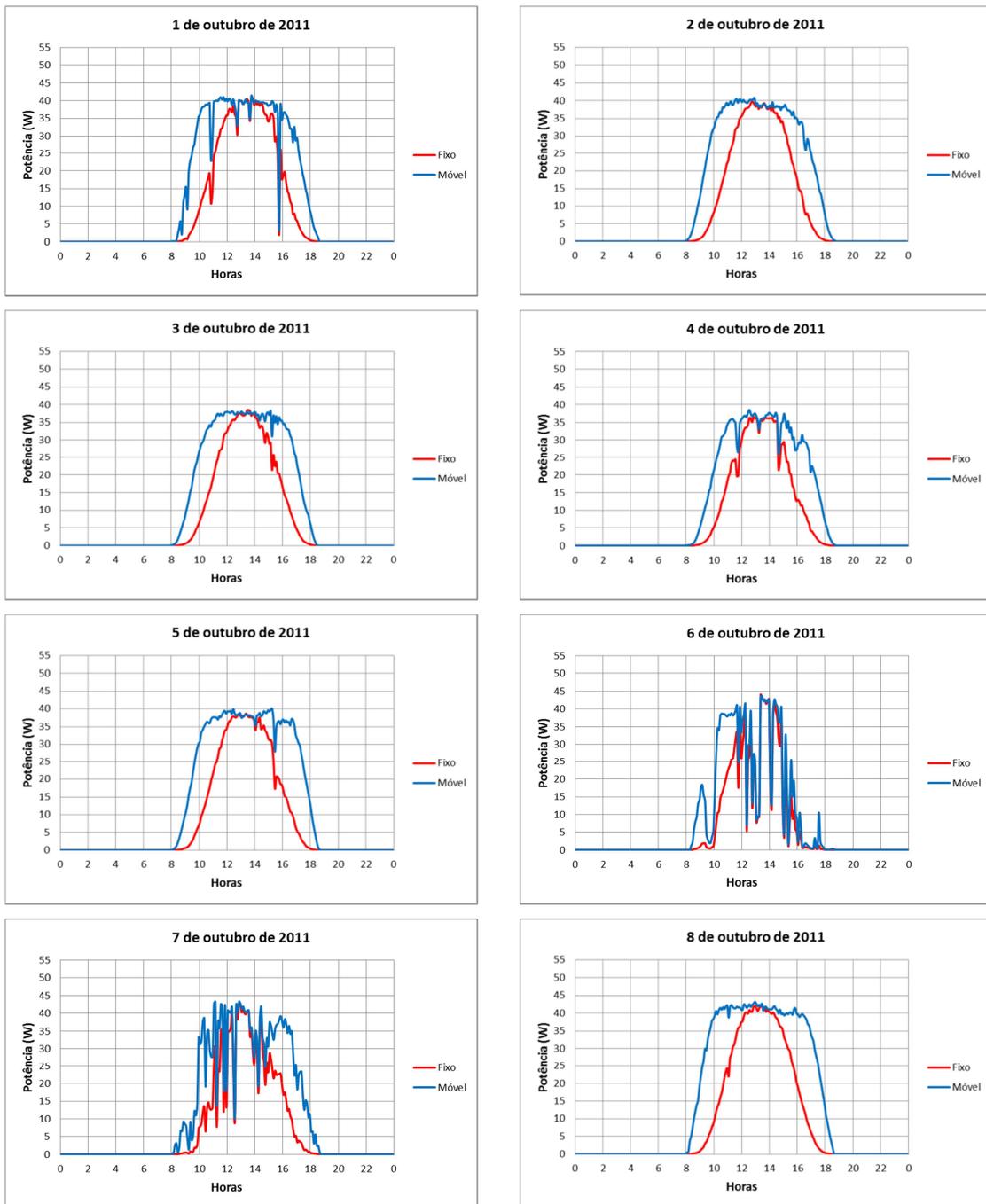


Figura A1.9 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 1 a 8 de outubro de 2011.

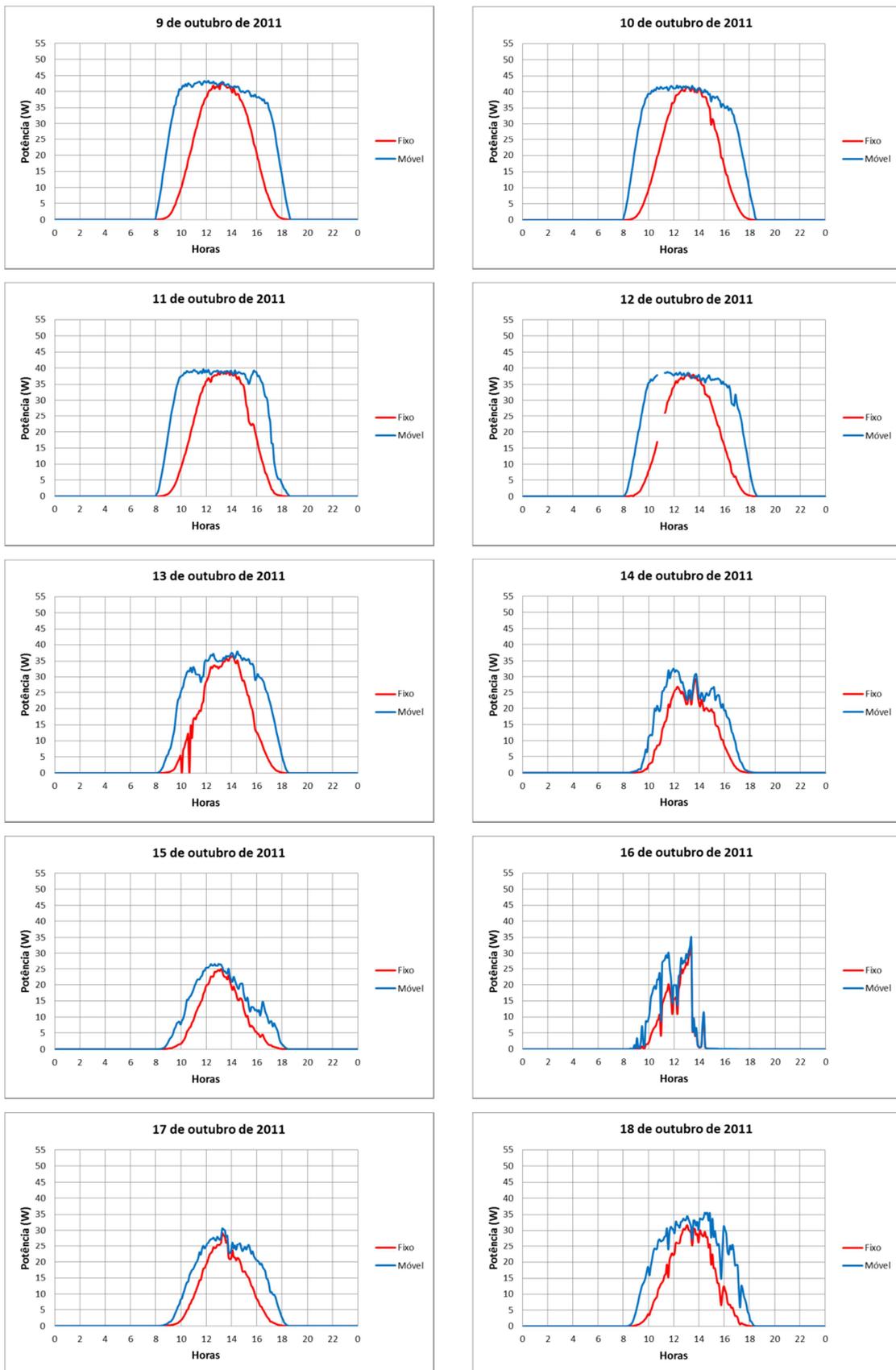


Figura A1.10 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 9 a 18 de outubro de 2011.

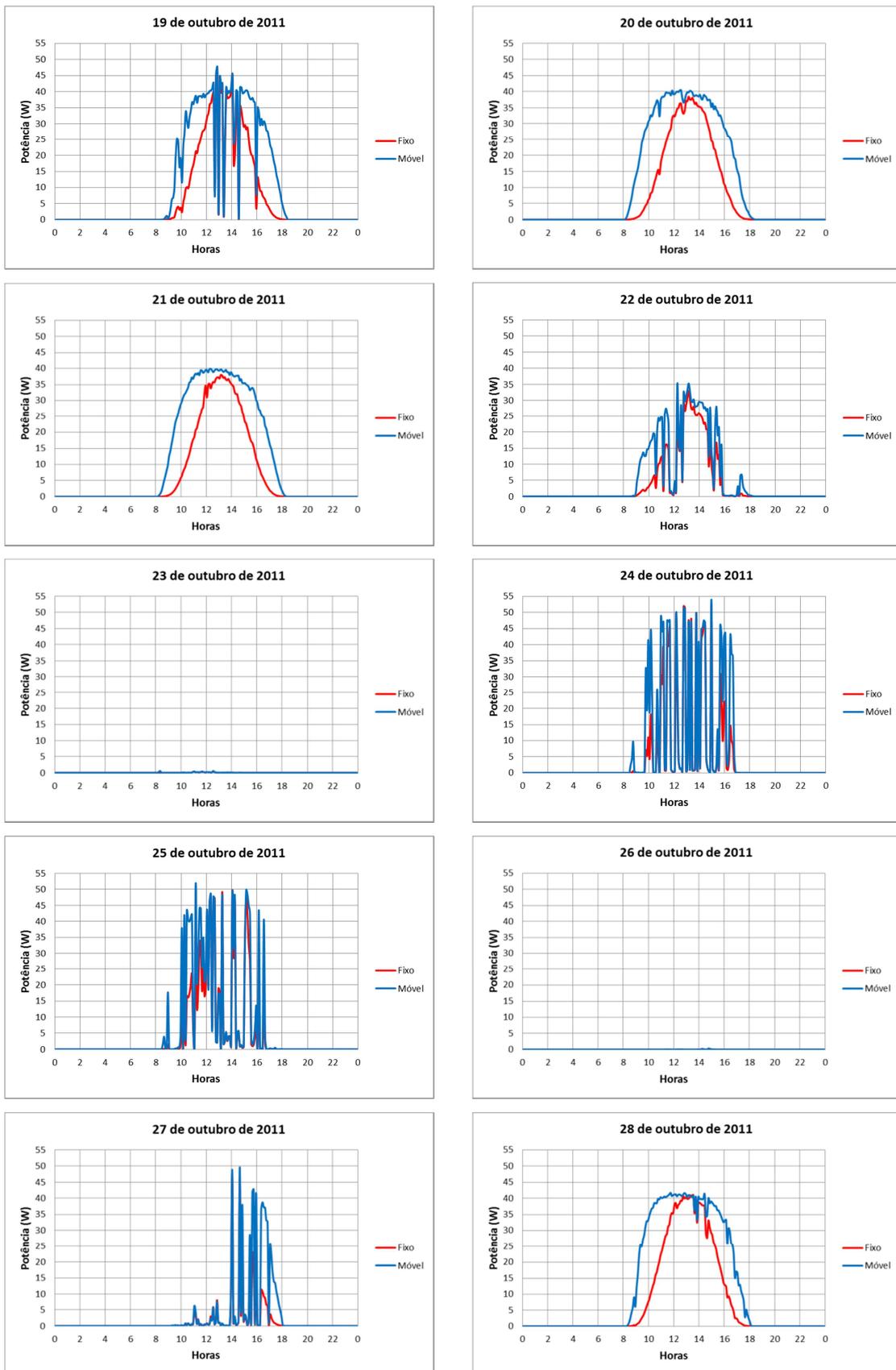


Figura A1.11 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 19 a 28 de outubro de 2011.

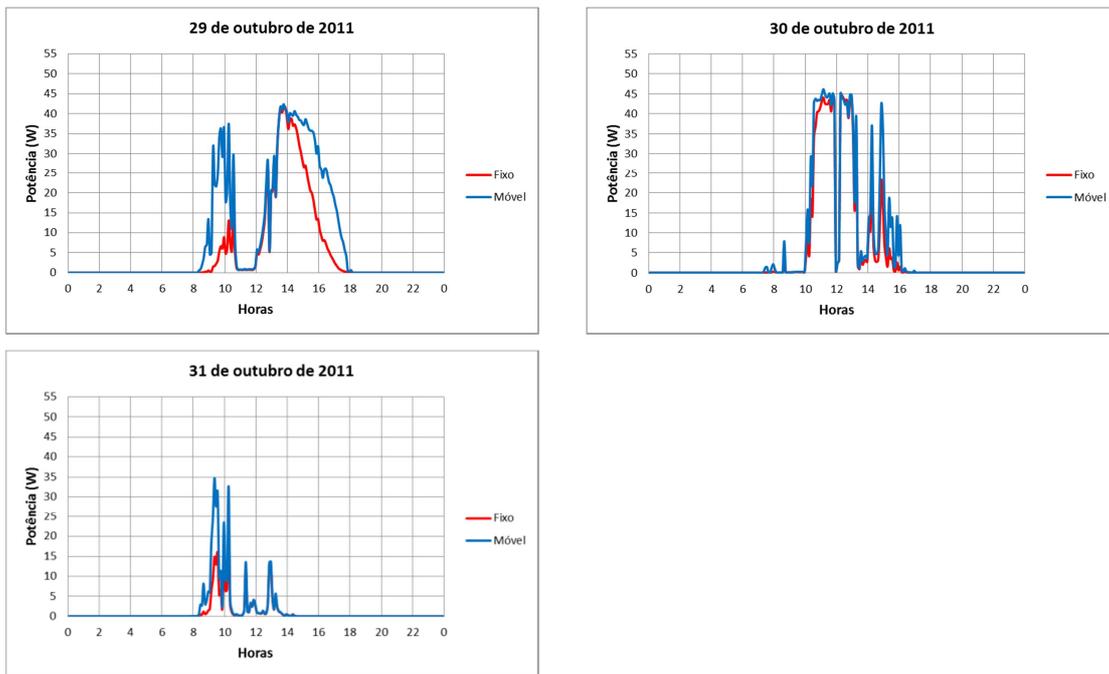


Figura A1.12 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 29 a 31 de outubro de 2011.

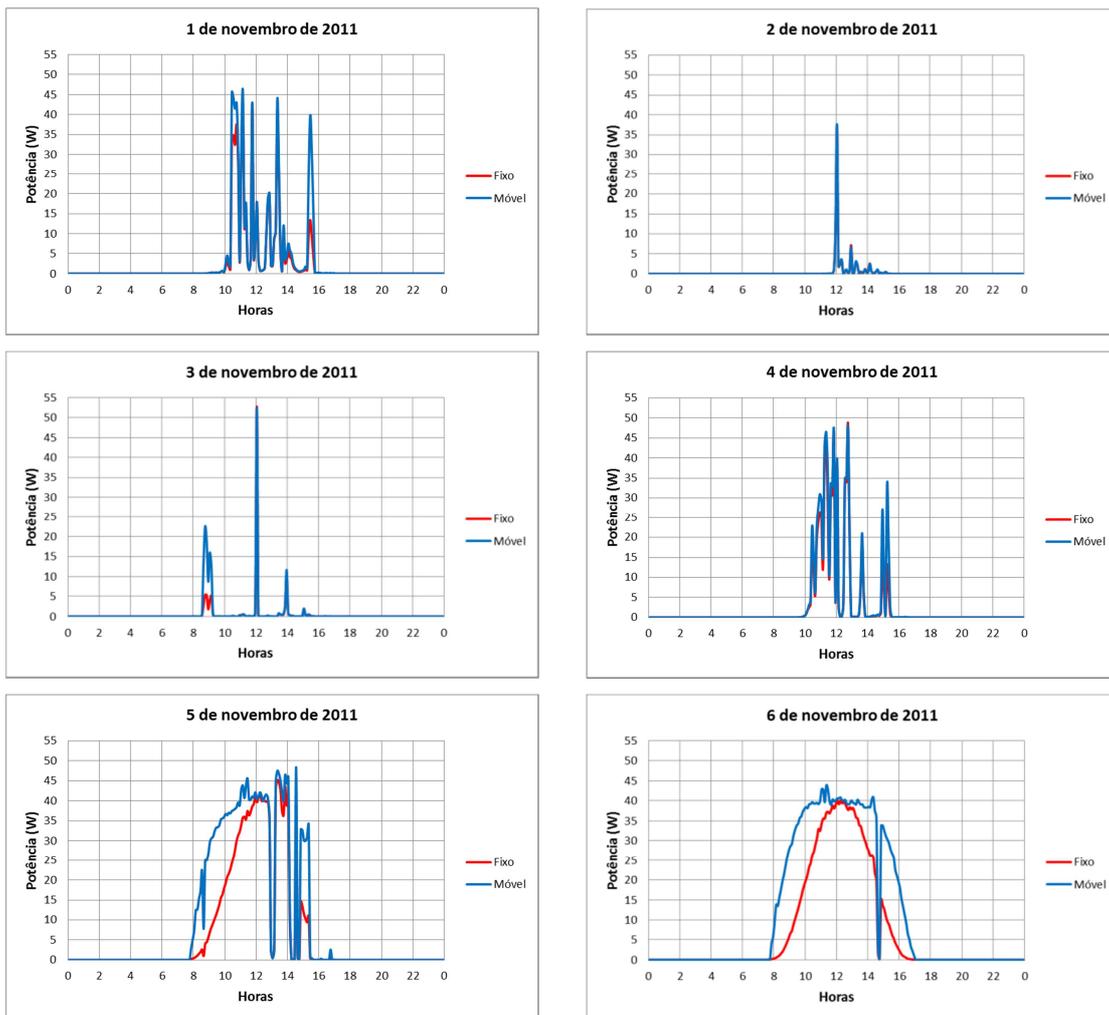


Figura A1.13 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 1 a 6 de novembro de 2011.

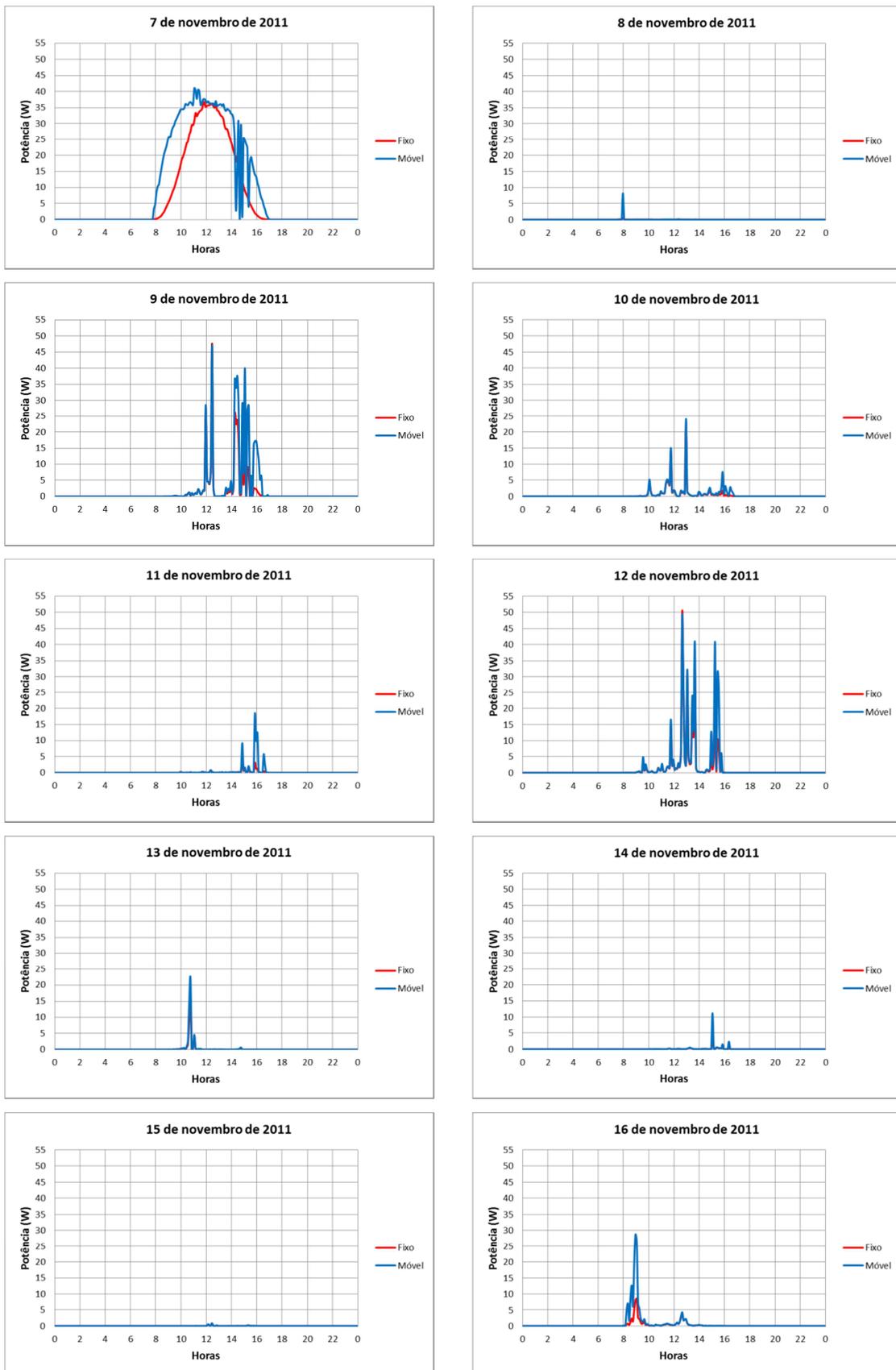


Figura A1.14 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 7 a 16 de novembro de 2011.

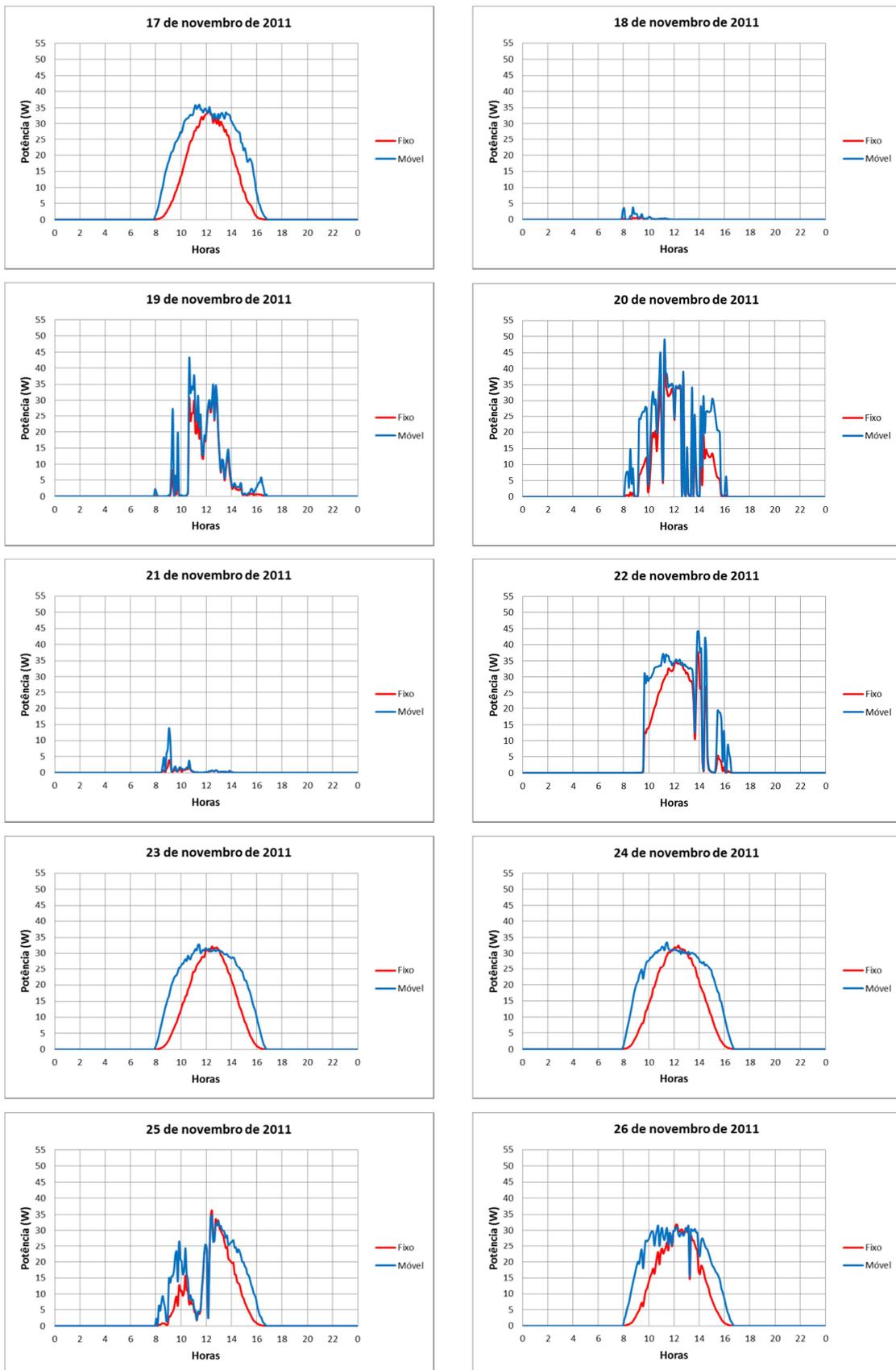


Figura A1.15 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 17 a 26 de novembro de 2011.

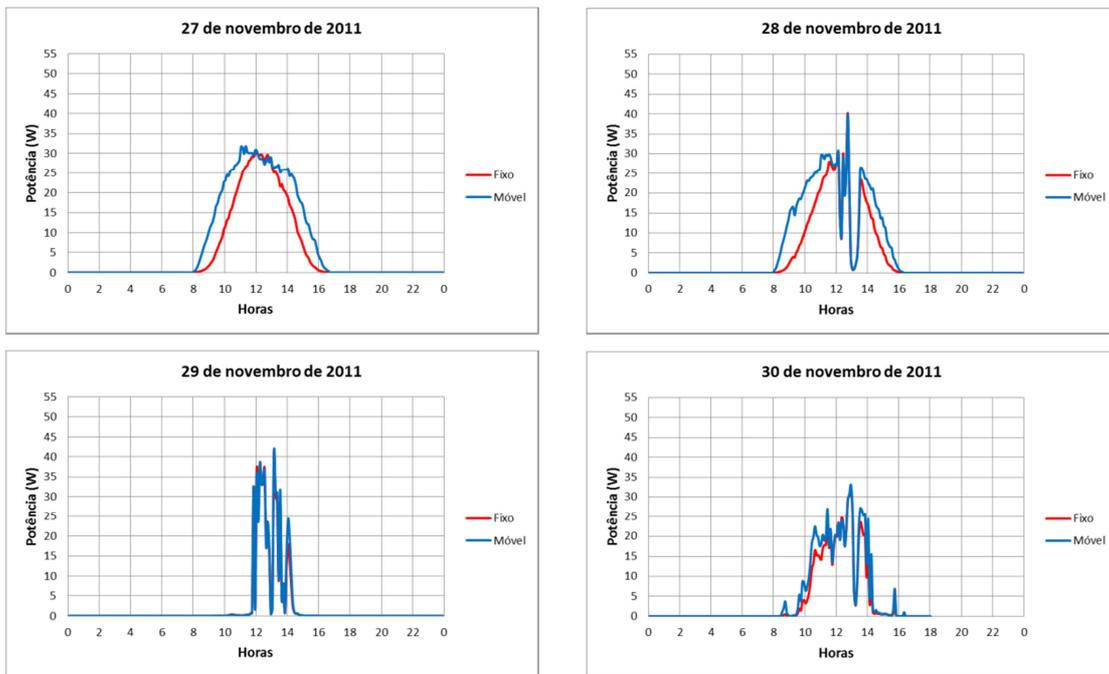


Figura A1.16 – Potência produzida pelos painéis fotovoltaicos fixo e móvel ao longo do dia, de 27 a 30 de novembro de 2011.

## APÊNDICE 2

### Utilização da ferramenta de simulação no sítio *Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps*.

Esta ferramenta de simulação que permite estimar a energia mensal produzida por um sistema fotovoltaico, assim como a radiação solar mensal ou ao longo de um dia, está disponível no sítio da Internet: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php#> e é usada via *online*, não sendo necessário instalar nenhum programa no computador.

Olhando para a Figura A2.1, ao selecionar 1, pode estimar-se a energia mensal produzida por um sistema fotovoltaico, ao selecionar 2 pode estimar-se a radiação solar mensal, e ao selecionar 3 a radiação solar ao longo do dia num mês à escolha.

The screenshot displays the PVGIS Interactive Maps interface. At the top, there are navigation tabs for 'Interactive Maps', 'Contact', and 'Important legal notice'. Below the navigation, there is a search bar and a map of Europe. The map is color-coded to show solar radiation levels, with a legend at the bottom indicating values from 200 to 2000 kWh/m². The right-hand panel is titled 'Performance of Grid-connected PV' and contains several configuration options: 'Radiation database' (dropdown), 'PV technology' (Crystalline silicon), 'Installed peak PV power' (1 kWp), 'Estimated system losses' (14%), 'Fixed mounting options' (Free-standing, Slope 35°, Azimuth 0°), 'Tracking options' (Vertical axis, Inclined axis, 2-axis tracking), 'Horizon file' (input field), and 'Output options' (Web page, Text file, PDF). A 'Calculate' button is located at the bottom of the right-hand panel.

Figura A2.1 – Ferramenta de simulação de sistema fotovoltaico.

Em primeiro lugar deve-se sempre entrar com a localização, como mostrado na Figura A2.2.

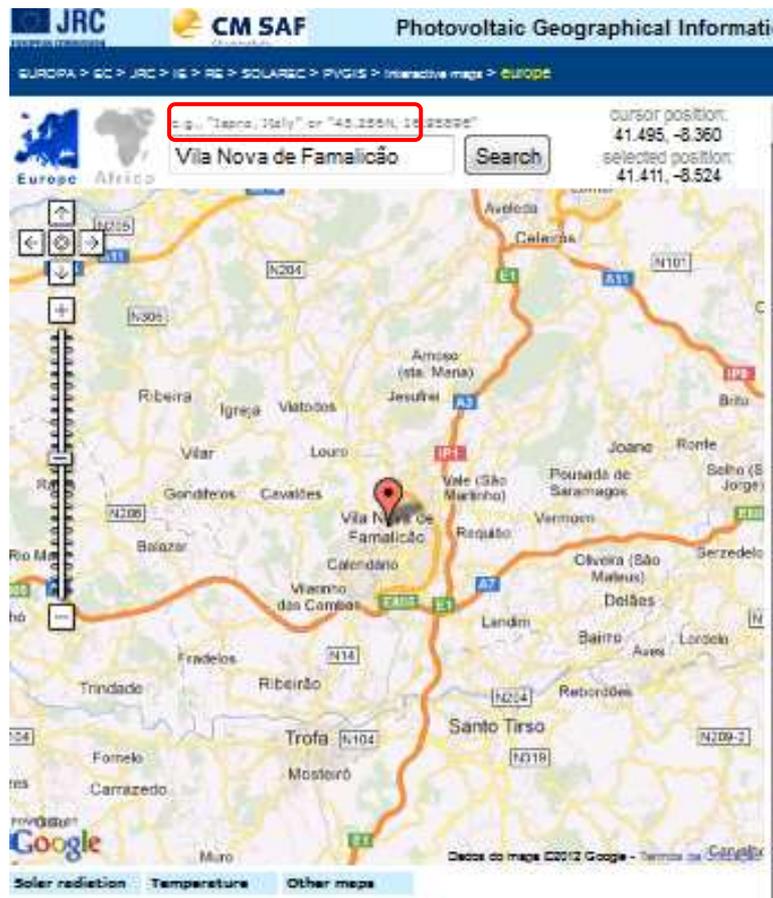


Figura A2.1 – Inserção da localização na ferramenta de simulação.

A seguir serão apresentadas as etapas para o uso desta ferramenta de simulação:

1. Para estimar a energia mensal produzida por um sistema fotovoltaico deve seleccionar-se a base de dados “Climate-SAF PVGIS”, que é a base de dados mais recente. A mesma não se encontra ainda disponível para algumas regiões (ver Figura A2.3).

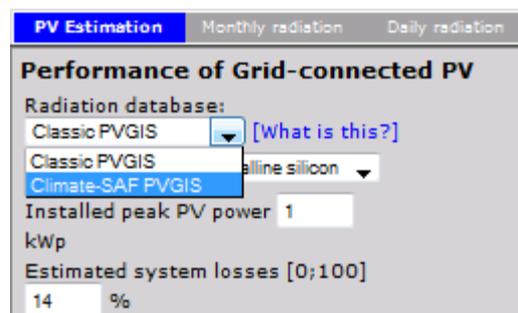


Figura A2.3 – Escolha da base de dados.

2. Selecionar a tecnologia dos painéis fotovoltaicos (ver Figura A2.4).

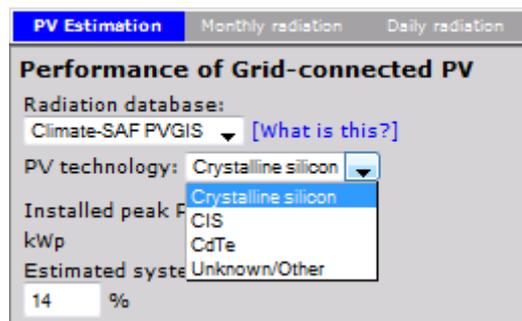


Figura A2.4 – Escolha da tecnologia dos painéis fotovoltaicos.

3. Inserir a potência máxima do sistema. Esta potência é dada pelos fabricantes dos painéis fotovoltaicos (ver Figura A2.5).



Figura A2.5 – Indicação da potência máxima do sistema fotovoltaico.

4. Inserir as perdas estimadas com os cabos, inversores, entre outros. As perdas são pré-definidas em 14% (ver Figura A2.6).

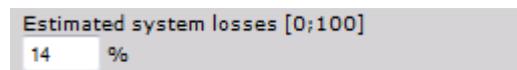


Figura A2.6 – Indicação das perdas estimadas para o sistema fotovoltaico.

5. A primeira opção é para os painéis fotovoltaicos montados sobre um suporte. A segunda opção é para painéis fotovoltaicos embutidos na estrutura de um edifício (ver Figura A2.7).

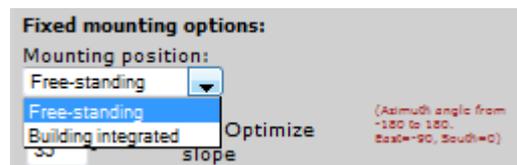


Figura A2.7 – Escolha do tipo de montagem dos painéis fotovoltaicos.

6. No campo *Slope* deve indicar-se a inclinação do painel fotovoltaico fixo em relação à horizontal. No campo *Azimuth* deve colocar-se a orientação do painel em relação ao sul geográfico. As opções *Optimize slope* e *Also optimize azimuth* permitem que a simulação seja feita na orientação ótima para o local em causa (ver Figura A2.8).

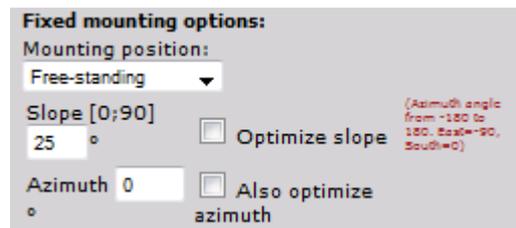


Figura A2.8 – Indicação da orientação dos painéis fotovoltaicos fixo.

7. Na “Tracking options” seleciona-se o tipo de seguidor que pode ser eixo vertical, eixo inclinado ou de dois eixos. No campo *Slope* deve indicar-se a inclinação do painel fotovoltaico em relação à horizontal. A opção *Optimize* permite que a simulação seja feita na orientação ótima para o local em causa (ver Figura A2.9).

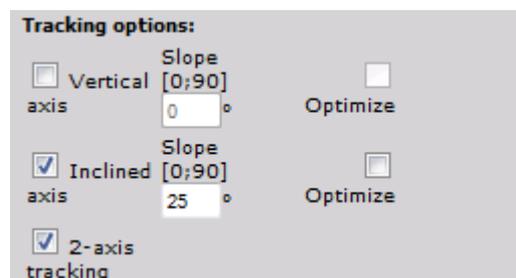


Figura A2.9 – Indicação do tipo e orientação dos painéis fotovoltaicos móveis.

8. Seleciona-se o tipo de ficheiro de saída e por fim pode efetuar-se os cálculos em *Calculate* (ver Figura A2.10).

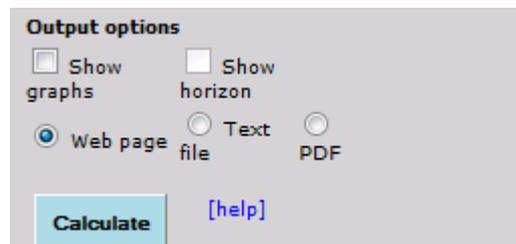


Figura A2.9 – Escolha do tipo de ficheiro de saída da simulação.