

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação



Avaliação da Rentabilidade Económica dos Sistemas de micro-geração Fotovoltaica em Portugal  
(1990-2010)

TIAGO MIGUEL ANTUNES DE CASTRO

Licenciado

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica – ramo de Energia

Orientador

(es):

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa

Professor Sérgio Miguel Redondo Faias

Júri:

Presidente: Professor Constantino Vital Sopa Soares

Vogais:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa

Professor Sérgio Miguel Redondo Faias

Professora Cristina Inês Camus

Janeiro 2013

”Se amanhã quiseres ser um grande profissional, começa hoje sendo um grande aprendiz.”

Inácio Dantas



## RESUMO

Energia renovável é qualquer fonte de energia que deriva direta ou indiretamente de processos naturais relacionados com a luz solar, armazenamento de calor na terra ou de forças gravitacionais e que é constante e naturalmente restabelecida. Esta dissertação pretende analisar e determinar em que medida a aposta no Sol, a fonte mais preciosa e inesgotável de energia que conhecemos, contribui para o restabelecimento do equilíbrio não apenas sócio-económico, mas também do meio ambiente do nosso planeta. Esta dissertação começa por abordar a descoberta da tecnologia fotovoltaica, a sua evolução em termos de rendimento e de produção, as tecnologias do presente e perspectivas de futuro e referem-se algumas das suas principais aplicações, iluminação pública e sinais rodoviários, por exemplo. Caracteriza-se o estado atual da energia fotovoltaica em Portugal em três vetores fundamentais: energia, economia e ambiente. Na vertente energética analisa-se a dependência energética nacional e a distribuição geográfica das instalações de micro geração de fotovoltaico, apenas para referir alguns pontos analisados. Na parte ambiental será analisado o estado atual do ambiente ao nível de gases nocivos e o que tem vindo a ser feito para combater este flagelo, nomeadamente o Protocolo de Quioto e as metas a cumprir. A parte económica analisa a evolução do custo dos sistemas fotovoltaicos, a legislação que regulamenta este tipo de atividade, as tarifas pagas ao produtor e o emprego gerado pelo crescimento desta atividade. Desenvolveu-se um estudo de caso onde se calcula a rentabilidade de sistemas fotovoltaicos já implementados, atendendo a diferentes índices económicos e variáveis (custos de instalação para o utilizador, custo médio unitário do kW e produção de energia). No final, espaço para as conclusões acerca do trabalho efetuado e ideias que podem ser implementadas/aperfeiçoadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fotovoltaico, Renovável, Micro-produção, Energia



## ABSTRACT

Renewable energy is any source of that is obtained directly or indirectly from natural processes related to sunlight, heat storage above the ground or gravitational forces and that are naturally restored. This thesis aims to analyze and determine in which way the bet on the Sun, the most precious and inexhaustible source of energy that we know, contributes to the restoration of the balance, not only in the socio-economic way but also the environment of our planet. This work begins by discussing the discovery of the photovoltaic technology and its evolution in terms of production technologies but also future prospects and refer to some of its main applications, like street lighting and road signs, for example. The current state of photovoltaics in Portugal will be analysed, in three key vectors: energy, economy and environment. In the energy field the national energy dependence and geographic distribution of the micro photovoltaic generation facilities , just to mention some of the points analysed. Related to the environment, it will be analyzed it's actual state at the level of harmful gases and what is being done to combat this problem, the Kyoto Protocol and the goals that need to be fulfilled. The economic part analyzes the evolution of the cost of PV systems, the laws made to regulate this type of activity, the prices paid to the producers and employment growth generated by this activity. The case study presented analyses the profitability of photovoltaic systems already implemented, given the different economic variables (installation costs for the user, the average unit cost of kW and energy production). In the end, space for the conclusions of the work done and future implementations.

**KEYWORDS:** Photovoltaic, Renewable, Microproduction, Energy, Economical Viability.



## AGRADECIMENTOS

Uma palavra de agradecimento aos meus orientadores, Professores Jorge Alberto Mendes de Sousa e Sérgio Miguel Redondo Faias, pela ajuda, disponibilidade e orientação ao longo deste percurso que foi o desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus colegas de curso, pelo companheirismo, entreaajuda e força ao longo da realização deste mestrado pelas diversas horas após as aulas e incontáveis fins de semanas empenhados neste objetivo.

Aos meus colegas de trabalho, pelo apoio dado.

Aos meus amigos, pela compreensão e motivação que me transmitiram.

Agradeço aos meus pais e irmã, por estarem sempre ao meu lado e por tudo que fizeram ao longo do curso e do meu trajeto pessoal.



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Motivações . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	3
1.3	Organização da Dissertação . . . . .	4
<b>2</b>	<b>TECNOLOGIA SOLAR FOTOVOLTAICA</b>	<b>5</b>
2.1	ENQUADRAMENTO HISTÓRICO . . . . .	5
2.2	EXPOSIÇÃO SOLAR . . . . .	6
2.2.1	O espectro da radiação solar . . . . .	6
2.2.2	A Irradiância solar . . . . .	8
2.2.3	Aumento da produção energética através do seguimento do movimento do Sol	12
2.3	PRIMEIRAS APLICAÇÕES DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS . . . . .	14
2.4	MATERIAIS UTILIZADOS . . . . .	15
2.4.1	Silício mono-cristalino . . . . .	17
2.4.2	Silício poli-cristalino . . . . .	17
2.4.3	Silício amorfo . . . . .	18
2.5	TECNOLOGIAS EMERGENTES E EM DESENVOLVIMENTO . . . . .	19
2.5.1	Filmes finos . . . . .	19
2.5.2	Células de multi-junção . . . . .	20
2.5.3	Células de concentração . . . . .	21
2.6	TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS . . . . .	26
2.6.1	O equipamento . . . . .	26
2.6.2	Sistemas autónomos . . . . .	27
2.6.3	Sistemas híbridos . . . . .	29
2.6.4	Sistemas ligados à rede . . . . .	30
<b>3</b>	<b>A ENERGIA FOTOVOLTAICA EM PORTUGAL</b>	<b>31</b>
3.1	ANÁLISE ENERGÉTICA . . . . .	31
3.1.1	Evolução do número de instalações em Portugal . . . . .	33
3.1.2	Evolução da potência instalada em Portugal . . . . .	35
3.1.3	Integração da produção fotovoltaica na rede elétrica nacional . . . . .	36
3.2	ANÁLISE ECONÓMICA . . . . .	37
3.2.1	Evolução do custo da tecnologia fotovoltaica . . . . .	37
3.2.2	Legislação e tarifas em Portugal . . . . .	38
3.2.3	Emprego . . . . .	44

3.3	AVALIAÇÃO AMBIENTAL . . . . .	46
3.3.1	Efeito de estufa . . . . .	46
3.3.2	Causas do efeito de estufa . . . . .	47
3.3.3	Consequências . . . . .	49
3.3.4	Protocolo de Quioto . . . . .	51
<b>4</b>	<b>AVALIAÇÃO ECONÓMICA DA MICRO-GERAÇÃO FOTOVOLTAICA</b>	<b>54</b>
4.1	Universo de estudo . . . . .	55
4.1.1	Sistemas Fixos . . . . .	56
4.1.2	Sistemas Seguidores . . . . .	58
4.2	Custos . . . . .	60
4.3	Custo médio unitário do kW . . . . .	61
4.4	Produção de energia . . . . .	63
4.5	Indicadores Económicos . . . . .	64
4.5.1	VAL . . . . .	64
4.5.2	TIR . . . . .	64
4.5.3	PR . . . . .	65
4.5.4	Indicadores económicos aplicados ao estudo de caso . . . . .	66
4.6	Análise e comparação de casos reais . . . . .	71
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS</b>	<b>77</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>80</b>

## Lista de Figuras

2.1	Espectro da radiação solar (adaptado de [20]) . . . . .	7
2.2	Fenómenos da radiação [6] . . . . .	7
2.3	Potencial de aproveitamento fotovoltaico na Europa [13] . . . . .	8
2.4	Irradiação solar em função do azimute e da altura solar ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ ) . . . . .	9
2.5	Irradiação global média sobre planos fixo e horizontal e inclinado . . . . .	10
2.6	Irradiação total anual e energia produzida por kW de fotovoltaico instalado [13] . . . . .	11
2.7	Sistema seguidor de dois eixos . . . . .	12
2.8	Sistema seguidor de um eixo [14] . . . . .	12
2.9	Comparação entre produções de diferentes sistemas (adaptado de [14]) . . . . .	13
2.10	Exemplos de utilização da tecnologia solar . . . . .	14
2.11	Constituição de um painel solar . . . . .	15
2.12	Agrupamento de células . . . . .	15
2.13	Estrutura de cristal de silício . . . . .	16
2.14	Diferentes tipos de células fotovoltaicas . . . . .	18
2.15	Evolução da eficiência de tecnologias fotovoltaicas (adaptado de [17]) . . . . .	21
2.16	Concentrador parabólico cilíndrico [1] . . . . .	22
2.17	Concentrador "dish collector" [1] . . . . .	23
2.18	Torre solar de concentração [1] . . . . .	24
2.19	Diagrama de blocos de inversores para conexão à rede . . . . .	27
2.20	Exemplos de inversores existentes no mercado . . . . .	27
2.21	Configuração de um sistema isolado da rede [19] . . . . .	28
2.22	Composição de um sistema híbrido . . . . .	29
2.23	Constituição de um sistema de micro geração conectado à rede [19] . . . . .	30
3.1	Primeiras aplicações dos sistemas fotovoltaicos em Portugal (1992-2004) . . . . .	31
3.2	Dependência energética dos países da UE (1998-2009) (adaptado de [23]) . . . . .	32
3.3	Recursos utilizados para produção de energia elétrica em Portugal (adaptado de [24]) . . . . .	33
3.4	Distribuição geográfica de instalações de micro-geração [25] . . . . .	34
3.5	Potência instalada acumulada em instalações de micro-geração fotovoltaica . . . . .	35
3.6	Potência com origem no fotovoltaico conetada à rede (adaptado de [24]) . . . . .	36
3.7	Evolução do custo de módulos fotovoltaicos [26] . . . . .	37
3.8	Evolução custo de sistemas fotovoltaicos (adaptado de [27]) . . . . .	38
3.9	Evolução das Tarifas aplicadas à Micro-geração (2009-2012) . . . . .	42
3.10	Evolução da tarifa de acordo com o DL 363/2007 . . . . .	42

3.11 Remuneração de uma instalação de potência 1kW de acordo com os diferentes Documentos Normativos . . . . .	43
3.12 Fluxo de empregabilidade no sector fotovoltaico (adaptado de [13]) . . . . .	44
3.13 Evolução da concentração de $CO_2$ na atmosfera e da temperatura terrestre . . . . .	47
4.1 Custo médio de uma micro-geração de 4 kW . . . . .	60
4.2 Custo unitário em diferentes instalações fotovoltaicas . . . . .	62
4.3 Produção de energia anual de uma instalação fotovoltaica de 4kW . . . . .	63
4.4 Tendência do VAL das instalações fotovoltaicas . . . . .	67
4.5 Relação da produção de energia entre sistemas seguidores . . . . .	68
4.6 Tendência da TIR das instalações fotovoltaicas . . . . .	69
4.7 Tendência do PR das instalações fotovoltaicas . . . . .	69
4.8 Interface do simulador PVGIS . . . . .	71
4.9 Comparação das produções - representação gráfica (caso 1) . . . . .	73
4.10 Comparação das produções - representação gráfica (caso 2) . . . . .	74
4.11 Comparação das produções - representação gráfica (caso 3) . . . . .	75

## Lista de Tabelas

2.1	Rendimento dos tipos de materiais usados em painéis fotovoltaicos (resumo da in- formação apresentada anteriormente) . . . . .	18
2.2	Eletricidade proveniente de parques CSP no total de consumo de eletricidade . . .	25
3.1	Produção de energia por unidade de energia instalada (kWh/kW) . . . . .	43
3.2	Mapa de emissões de gases CFC . . . . .	52
4.1	Estimativa de produção de energia num sistema fotovoltaico fixo . . . . .	66
4.2	Remuneração de acordo com DL363/2007 . . . . .	66
4.3	Rendimento estimado (€) num sistema fotovoltaico fixo . . . . .	66
4.4	VAL médio das instalações fotovoltaicas . . . . .	67
4.5	TIR médio das instalações fotovoltaicas . . . . .	68
4.6	PR médio das instalações fotovoltaicas . . . . .	69
4.7	Dados de entrada do simulador PVGIS . . . . .	72
4.8	Comparação das produções mensais (caso 1) . . . . .	72
4.9	Total de energia produzida e teórica (caso 1) . . . . .	72
4.10	Comparação das produções mensais (caso 2) . . . . .	73
4.11	Total de energia produzida e teórica (caso 2) . . . . .	74
4.12	Comparação das produções mensais (caso 3) . . . . .	75
4.13	Total de energia produzida e teórica (caso 3) . . . . .	75

AC	Corrente Alternada
Br	Boro
BrAs	Arseneto de Boro
c€/ kW	cêntimos de Euro por kiloWatt
CdTe	Cádmio-Telúrio
CH <sub>4</sub>	Metano
CiGs	Cobre-Índio-Gálio-Selénio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CPV	Concentradores Fotovoltaicos
DC	Corrente contínua
DL	Decreto-Lei
$E_o$	Constante Solar
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
EUA	Estados Unidos da América
FER	Fontes Energia Renovável
FV	Foto Voltaico
GEE	Gases Efeito de Estufa
GT	Giga Toneladas
GWp	GigaWatt pico
I	Corrente
IEA	Internacional Energy Agency
INP	Fosforeto de Índio
IPCO	Intergovernmental Panel on Climate Change
km	Quilómetros
KNO <sub>3</sub>	Nitrato de Potássio
kVA	Quilo Volt-Ampere
kWh/a	Quilo Watt-hora/ anual
MWp	MegaWatt pico
N <sub>2</sub> O	Óxido Nitroso
NaNO <sub>3</sub>	Nitrato de Sódio
°C	Graus Centrígados
OCDE	Organisation for Economic Co-Operation and Development
P	Fósforo
PIB	Produto Interno Bruto
ppm	Partículas por milhão

PQ	Protocolo de Quioto
PR	Período de Retorno
PRE	Produção Regime Especial
PVGIS	Programa de Simulação para Sistemas Fotovoltaicos
REN	Rede Energética Nacional
SEI	Sistema Elétrico Independente
SF <sub>6</sub>	Hexafluoreto de Enxofre
TIR	Taxa Interna de Rentabilidade
$\mu\text{m}$	micrómetro
USD	United States Dollars
UV	Ultra - Violeta
VAL	Valor Actual Líquido
W	Watt
W/m <sup>2</sup>	Watt por metro quadrado



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivações

Energia renovável é qualquer fonte de energia que deriva direta ou indiretamente de processos naturais relacionados com a luz solar, armazenamento de calor na terra ou de forças gravitacionais e que é constante e naturalmente restabelecida. Caso o ritmo de extração de uma determinada fonte de energia não exceda o seu natural ritmo de reposição, então um recurso é dito renovável. Eletricidade renovável pode ser obtida a partir do vento, sol, água, entre outras formas. A energia proveniente do Sol é a fonte de energia mais abundante no planeta Terra. A energia solar que atinge numa hora a superfície terrestre é suficiente para suportar a energia consumida por todas as atividades humanas num ano. Embora o seu contributo seja residual (representava em 2010, segundo o relatório do IEA [1] apenas 0,1% da produção de energia), a energia solar fotovoltaica apresenta um futuro particularmente promissor, tendo vindo o seu crescimento anual superar uma taxa média superior a 40% desde o início do milénio e, segundo diversos estudos, continuará a manter esta tendência crescente ao longo das próximas décadas [1]. Em particular, o estudo “Technology roadmap solar photovoltaic energy” [1] datado de 2010 e elaborado pelo IEA prevê que até ao ano de 2050, a tecnologia fotovoltaica forneça cerca de 11% da produção global de eletricidade (4 PWh), o que corresponde à tecnologia dos dias de hoje, a 3 Terawatts de capacidade fotovoltaica instalada acumulada. Alcançar esta meta exigirá um esforço político forte e equilibrado no decorrer dos próximos anos de modo a permitir o progresso da tecnologia e a uma redução dos custos de produção.

Esta tendência crescente na necessidade de alternativas energéticas vai ao encontro da necessidade urgente da liberalização dos mercados de energia, ao reconhecimento da importância da produção descentralizada e claro, do avançar da tecnologia. Existe o sentimento generalizado que este tipo de tecnologia representa o caminho a seguir pela Humanidade na procura do equilíbrio climático do planeta Terra dado que, além de contribuir para reduções significativas das emissões de gases com efeito de estufa e um desenvolvimento socioeconómico, esta energia traz benefícios em termos de segurança do aprovisionamento energético, tão em voga nos dias de hoje. O primordial objetivo desta dissertação prende-se com a identificação e caracterização de diferentes índices relacionados com o impacto desta tecnologia, do ponto de vista económico, ambiental e energético, sendo abordada a evolução da tecnologia fotovoltaica, desde os seus primeiros passos até aos dias de hoje, as tecnologias emergentes e o futuro que se augura alcançar. É dada atenção às políticas mundiais e nacionais que têm vindo a ser implementadas, bem como os benefícios económicos que advêm na aposta de uma energia limpa e inesgotável, sobretudo no Protocolo de Quioto e a sua importância. Hoje em dia, com o fenómeno do efeito de estufa e com a constante diminuição das reservas

de combustíveis fósseis, a escolha do tipo de geração de energia revela-se cada vez mais crítica e importante, com o mundo em que vivemos ter vindo a sofrer bastantes alterações nos últimos anos. O uso excessivo de combustíveis fósseis tem vindo a alterar consideravelmente o nosso Ecosistema e Sociedade. A temperatura tem vindo a aumentar sem precedentes nas últimas décadas, as estações estão a sofrer mudanças radicais e cabe a cada um de nós lutar pelo nosso Planeta. O constante aumento de preços dos combustíveis fósseis tem vindo a criar um monopólio de nações sobre nações, em que a balança pende naturalmente para quem possui os recursos naturais com que ditam as leis de mercado. Outro aspeto a ser abordado passa pela possibilidade de ligação à rede de sistemas outrora autónomos. Para combater estes e outros males, diversos países têm vindo a adotar a produção da sua própria energia de uma forma "amiga do ambiente", para parar e tentar reverter os efeitos devastadores das políticas energéticas praticadas ao longo dos últimos anos [4]. Num local tão privilegiado como Portugal, onde o Sol se encontra disponível em "grande quantidade" durante o ano inteiro, têm vindo a ser desenvolvidos sistemas produtores de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos.

## 1.2 Objetivos

Propõe-se com a presente dissertação realizar uma caracterização do estado da arte da energia fotovoltaica a nível mundial, focando particularmente a nível interno. Esta caracterização irá debruçar-se sobre três importantes vetores: energia, economia e ambiente. Para a consecução deste objetivo, será analisada a evolução da tecnologia fotovoltaica ao longo dos últimos anos, as suas primeiras aplicações, constituição e as tecnologias emergentes. Pretende-se dar a conhecer as diferentes tecnologias utilizadas na produção de energia elétrica através do Sol e os equipamentos necessários para o efeito. Será analisada a previsão de crescimento de instalações e de potência instalada, será caracterizado o sistema energético nacional, bem como os incentivos criados para o desenvolvimento desta tecnologia de geração elétrica e em que medida estas políticas energéticas surtiram efeito, no que diz respeito ao impacto que o aumento de instalações tem no parque electroprodutor português, na emissão de gases para a atmosfera e na economia, ao nível do emprego. Complementarmente à caracterização do estado da arte, a dissertação apresentará um estudo de viabilidade económica de diversas instalações fotovoltaicas, atendendo ao conjunto de variáveis que são habitualmente críticas neste tipo de investimento: custos de instalação para o utilizador, custo médio unitário do kW, a produção de energia que o sistema poderá produzir e o retorno económico expectável. Pretende-se determinar a rentabilidade do investimento através da análise dos seguintes indicadores económicos: VAL (Valor Atual Líquido), TIR (Taxa Interna de Rentabilidade) bem como determinar o PR (Período de Retorno) do capital investido. Para cada caso, foi feito o estudo para um sistema fixo e um sistema seguidor, por forma a tentar determinar qual o sistema mais vantajoso em termos económicos a ser implementado.

### 1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos de desenvolvimento e um capítulo final, destinado a conclusões.

O capítulo inicial indica os motivos que levaram a desenvolver este trabalho e o que se pretende atingir com a redação desta dissertação.

O segundo capítulo faz um enquadramento geral do que é a tecnologia fotovoltaica, desde a sua descoberta, as suas primeiras e principais utilizações desde o seu aparecimento até aos dias de hoje, as inovações de que esta área tem vindo a ser alvo e a posição privilegiada de Portugal para o aproveitamento deste valioso recurso energético comparativamente a outros países Europeus.

O terceiro capítulo divide-se em três sub-capítulos, cada um vocacionado para uma área distinta: energética, económica e ambiental, avaliando os benefícios energéticos que advém da utilização desta tecnologia, quer a nível interno quer a nível mundial.

Será analisado o impacto económico da tecnologia fotovoltaica, incidindo a análise particularmente nos custos envolvidos, incentivos dados pelos governadores, fazendo referência aos diplomas que foram sendo publicados a evolução da remuneração paga aos produtores de eletricidade e os empregos gerados pelo desenvolvimento desta tecnologia.

Por último neste terceiro capítulo, serão abordadas as alterações climáticas e de que forma a implementação da tecnologia fotovoltaica tem dado o seu contributo para inverter a tendência das últimas décadas a este nível.

O capítulo quatro desenvolve um estudo e análise de um conjunto de 25 instalações fotovoltaicas executadas no período de tempo entre 2007 e Março de 2012. Nesta análise foram analisadas e comparadas algumas características das instalações, nomeadamente o seu custo, a sua potência, a energia produzida e a remuneração teórica que se pode esperar destas instalações. Analisa-se a evolução destas variáveis e faz-se a sua comparação entre sistemas fixos e sistemas seguidores solares por forma a determinar as vantagens e desvantagens de cada uma das instalações. Para terminar serão analisadas as produções reais de três instalações e será feita uma comparação com os seus valores teóricos.

O capítulo cinco faz uma análise global e apresenta as conclusões do trabalho desenvolvido, deixando algumas considerações para futuros trabalhos.

## 2 TECNOLOGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

### 2.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

O efeito fotovoltaico pode definir-se como sendo a produção de uma diferença de potencial quando se mergulham placas metálicas num eletrólito e se expõem estas à luz solar. O efeito fotovoltaico propriamente dito foi observado pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel que verificou que placas de prata, quando mergulhadas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz solar. Na sequência desta descoberta, e após diversos aperfeiçoamentos, em 1877, William Adams e Richard Day (aluno do primeiro) desenvolveram o primeiro dispositivo sólido de foto-produção de eletricidade [5]. Tratava-se de uma película de selénio depositado num substrato de ferro, em que uma película muito fina de ouro servia de contacto frontal entre estes elementos. Este dispositivo apresentava uma eficiência de conversão de aproximadamente 0,5%. Posteriormente, em 1883, o investigador Charles Fritts duplicou essa eficiência (1%), com uma mistura de duas placas de ouro, outro metal separadas por selénio, tendo sido aqui construídas as primeiras células solares. A eficiência da célula de selénio não chegava a 1%, mas com a evolução científica do início do século XX, principalmente devido à explicação do efeito fotoelétrico por Albert Einstein em 1905, a mecânica quântica com a teoria das bandas de energia, física dos semicondutores com os processos de purificação e dopagem aplicadas aos transmissores, em 1954 foi anunciada a primeira célula fotovoltaica usando silício (com eficiência de 6%), desenvolvida pelos investigadores Calvin Fuller (químico), Gerald Pearson (físico) e Daryl Chapin (engenheiro), em New Jersey, nos Estados Unidos da América [5]. Esta célula solar “moderna” tinha apenas dois centímetros quadrados de área e gerava 5 mW de potência elétrica. Foi este o momento que marcou o início da era moderna da energia solar, tendo sido formalmente apresentada na reunião anual da National Academy of Sciences, em Washington. No entanto, o facto de o custo de produção rondar sensivelmente os 200 USD (150 €)/Watt naquela época, fez com que esta tecnologia não fosse considerada para produção de energia durante várias décadas. No entanto, criou-se a possibilidade de produção de energia em locais distantes onde não havia facilidade de entrega de combustíveis fósseis. No decorrer da década de 1990, o interesse na área fotovoltaica evoluiu com a necessidade de obter fontes de energia alternativa aos combustíveis fósseis [6].

## 2.2 EXPOSIÇÃO SOLAR

O Sol fornece energia sob a forma de radiação, radiação essa que é a base de toda a vida na Terra. No centro do Sol, a fusão transforma núcleos de hidrogénio em núcleos de hélio. Durante este processo, parte da massa é transformada em energia. Devido à grande distância existente entre o Sol e a Terra, apenas uma mínima parte (aproximadamente duas partes por milhão) da radiação solar emitida atinge a superfície da Terra. Esta radiação é equivalente a uma quantidade de energia de  $1 \times 10^{18}$  kWh/ano. Esta quantidade de energia solar que atinge a superfície da Terra corresponde, aproximadamente, a dez mil vezes à procura global de energia. Por outras palavras, teríamos apenas de aproveitar 0,01 % desta energia para satisfazer a procura energética total da humanidade [7].

Desta forma, a intensidade da radiação solar fora da atmosfera, é variável consoante a distância entre o Sol e a Terra. Durante o decorrer do ano, pode variar entre  $1,47 \times 10^8$  km e  $1,52 \times 10^8$  km. Devido a esta variação facto, a irradiância pode ter valores a variar de  $1365 \text{ W/m}^2$  e  $1412 \text{ W/m}^2$  [8]. O valor médio é designado por constante solar  $E_0 = 1.367 \text{ W/m}^2$ , com o qual é possível determinar (entre outros parâmetros), a radiação que incide na superfície terrestre num determinado momento.

### 2.2.1 O espectro da radiação solar

A radiação pode ser definida como uma forma de transferência de calor em que a energia é transferida de um corpo para outro sem que o espaço entre ambos seja aquecido de igual forma. A energia radiante solar percorre o espaço sob a forma de ondas eletromagnéticas e aquece a superfície terrestre sem causar um aumento significativo da temperatura do ar [9]. A radiação solar é constituída por um espectro constituído por frequências variáveis, que vão desde os infravermelhos até às altas frequências (raios ultravioletas). Convém referir que 99% da energia radiada pelo sol tem comprimentos de onda compreendidos entre  $0,280 \mu\text{m}$  e  $0,496 \mu\text{m}$  (UV), que representa uma parcela relativamente pequena do espectro eletromagnético, como se pode ver pela Figura 2.1, apresentada de seguida [10].

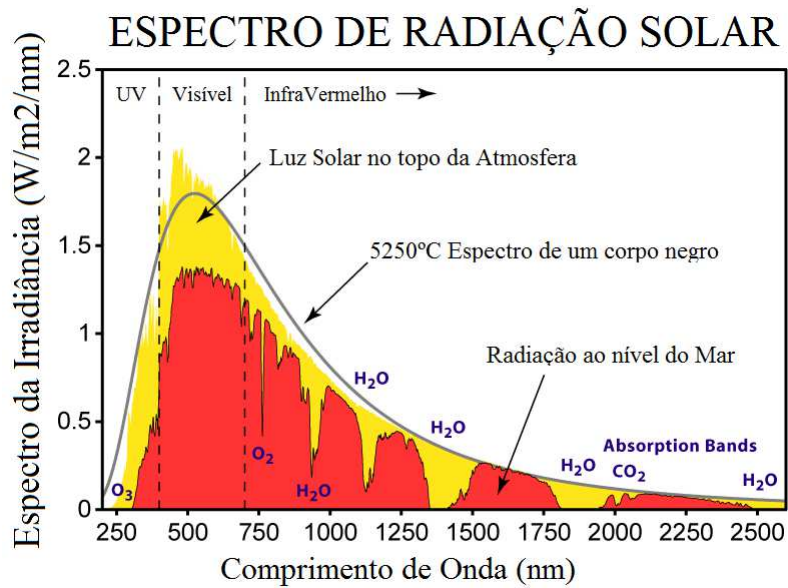


Figura 2.1: Espectro da radiação solar (adaptado de [20])

Do total desta energia, uma quantidade considerável não chega a atingir a superfície da Terra, devido a diversos fenômenos, denominados por reflexão e atenuação. A atenuação é resultante da pressão exercida pela camada do ozono e pela absorção de raios infravermelhos pelas moléculas de  $H_2O$ ,  $O_2$  e  $CO_2$  da atmosfera. Devido aos fenômenos descritos anteriormente, a radiação que chega à superfície da Terra é composta por duas componentes apenas, a radiação direta e a radiação difusa. Ao passarem na atmosfera os raios solares são em grande parte absorvidos, pelo que apenas metade da radiação solar que chega à atmosfera atinge efetivamente a superfície terrestre. A Figura 2.2 demonstra os fenômenos ocorridos da radiação solar antes da sua chegada à superfície terrestre [11]:



Figura 2.2: Fenômenos da radiação [6]

### 2.2.2 A Irradiância solar

A irradiância solar varia de acordo com o ângulo de incidência dos raios solares. O ângulo formado entre o zenite local e os raios solares incidentes na superfície terrestre, é denominado por ângulo zenital. Quanto maior for o ângulo de incidência, menor a irradiância solar. O nível de irradiância na Terra é de aproximadamente  $1000 \text{ W/m}^2$  com boas condições climáticas, independentemente da localização. Ao adicionar a quantidade total da radiação solar que incide na superfície terrestre durante o período de um ano, obtém-se a irradiação global anual, medida em  $\text{kWh/m}^2$ . Este parâmetro varia de um modo significativo com as regiões, evidenciando a Figura 2.3, apresentada de seguida, a situação na Europa [12].

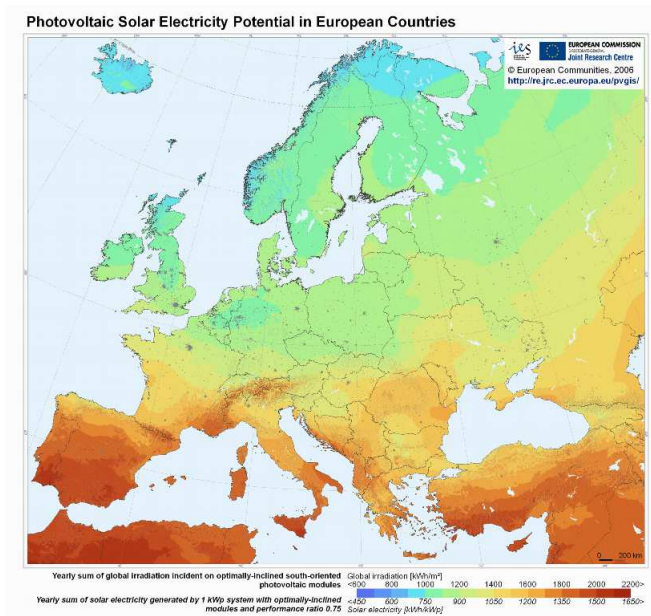


Figura 2.3: Potencial de aproveitamento fotovoltaico na Europa [13]

A irradiação solar, em regiões situadas perto do Equador, excede os  $2300 \text{ kWh/m}^2$  por ano, ao passo que no sul da Europa este valor não ultrapassa os  $2000 \text{ kWh/m}^2$ . Em Portugal, este valor situa-se entre os 1300 (a norte) e os  $1800 \text{ kWh/m}^2$  (a sul) sendo notáveis as diferenças sazonais existentes por toda a Europa, fazendo de Portugal um país privilegiado para o aproveitamento deste recurso, dado que, a título exemplificativo, a Alemanha, atualmente o país mundial com maior potência instalada em sistemas fotovoltaicos, apresenta valores a rondar os  $1400 \text{ kWh/m}^2$ , claramente inferiores a Portugal [13].

A radiação solar é sempre superior numa área que se estende perpendicularmente em relação aos raios solares, do que numa área horizontal das mesmas dimensões. Dado que o azimute e a distância solar são variáveis ao longo do dia e do ano, o ângulo de incidência da radiação solar

varia constantemente nas zonas de aproveitamento da energia solar [12] .

A orientação ótima de um painel fixo não é óbvia, existindo diversos fatores a ter em conta. Na prática recomenda-se que sejam orientados de modo a que a sua parte frontal fique virada para o Sul geográfico (ou Norte, quando no hemisfério Sul). Quando o Sol alcança o ponto mais alto da sua trajetória (meio dia), a sua posição coincide com o Sul geográfico. Para conseguir um melhor aproveitamento da radiação solar incidente, os módulos deverão estar inclinados em relação ao plano horizontal num ângulo que variará com a latitude do local da instalação, sendo recomendada, em Portugal, a adoção dos seguintes ângulos de inclinação:

Inverno: Latitude do local + 15°

Verão: Latitude do local - 15°

Este é o ângulo de inclinação que geralmente maximiza a radiação solar no plano em que os painéis fotovoltaicos se encontram instalados em função da estação do ano. Por norma, os painéis são instalados segundo a inclinação de Verão, dado ser o Verão a estação do ano que melhor rentabiliza a instalação fotovoltaica devido ao maior número de horas de exposição solar e à fraca ocorrência de nuvens.

A Figura 2.4 representa um estudo levado a cabo que representa a irradiação solar anual incidente numa área de um metro quadrado, em função do azimute e da inclinação solar.

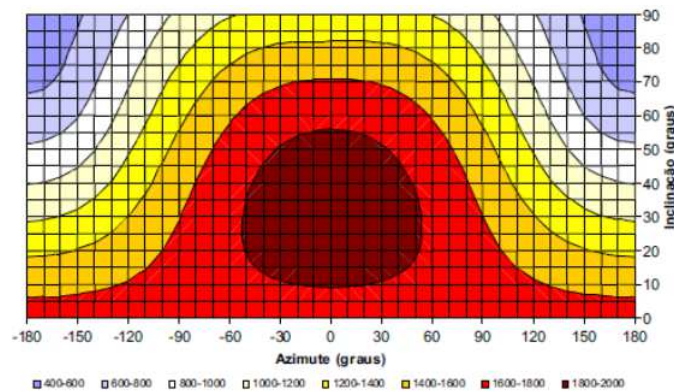


Figura 2.4: Irradiação solar em função do azimute e da altura solar ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ )

As diferentes orientações dadas à instalação solar resultam em diferentes níveis de irradiação. Em Portugal, a orientação ótima de uma instalação é na direção Sul, com um ângulo de 30° de inclinação. Neste caso, o nível de irradiação é quinze por cento superior relativamente a uma área horizontal (ângulo de inclinação = 0°).

A construção de instalações solares em telhados inclinados, com orientações diferentes da posição definida como ótima, traduz-se numa menor produção de energia devido à redução da radiação incidente. Uma orientação para Sudoeste ou Sudeste dos telhados, ou uma inclinação entre 20°

e  $50^\circ$  implicam uma redução da energia produzida em cerca de dez por cento. Os telhados em que a orientação varie ainda mais da posição ótima podem igualmente ser explorados, mas nesta situação a menor irradiação deverá ser tida em conta. A utilização das fachadas para a integração de tecnologias solares (ângulo de inclinação =  $90^\circ$ ) implica uma produção de energia menor, devido à redução significativa da irradiação. Neste caso, a boa visibilidade da instalação solar (o proveito da imagem), aspetos de design, entre outros fatores, têm um papel vital para a decisão final sobre a construção da fachada com este material.

Pela análise da Figura 2.4 é possível verificar que à medida que o ângulo de azimute aumenta com uma inclinação constante a radiação anual total diminui. Durante o intervalo  $[-90^\circ; +90^\circ]$  de ângulo de azimute (orientação Nascente e Poente), a radiação total máxima diminui sensivelmente 20% para ângulos de inclinação mais baixos. Por outro lado, com ângulos de inclinação maiores, essa redução é mais significativa, chegando mesmo a uma redução para metade em superfícies na vertical. Para ângulos de azimute superiores a  $90^\circ$ , essa redução torna-se cada vez maior com perdas a poderem atingir os 50% comparativamente à radiação máxima. Para superfícies orientadas a Norte e na vertical, como já vistas anteriormente, a radiação total sofre uma redução de 70%, o que revela uma forte quebra em termos de produção.

Utilizando os dados disponíveis em [13] e recorrendo a estudos feitos em [7], apresenta-se de seguida a Figura 2.5, que representa os valores médios mensais da irradiação obtida em planos com inclinação nula, perto da ótima ( $30^\circ$ ) e com uma inclinação de  $60^\circ$  na zona de Lisboa.

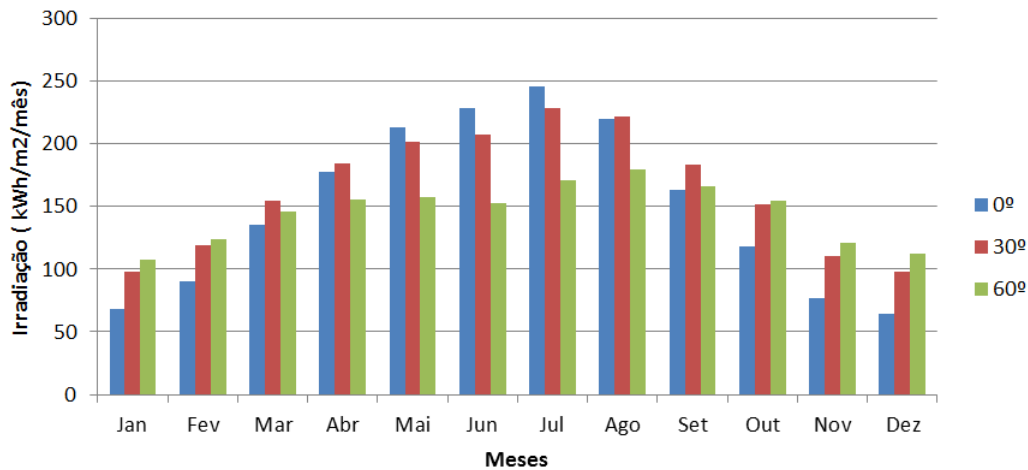
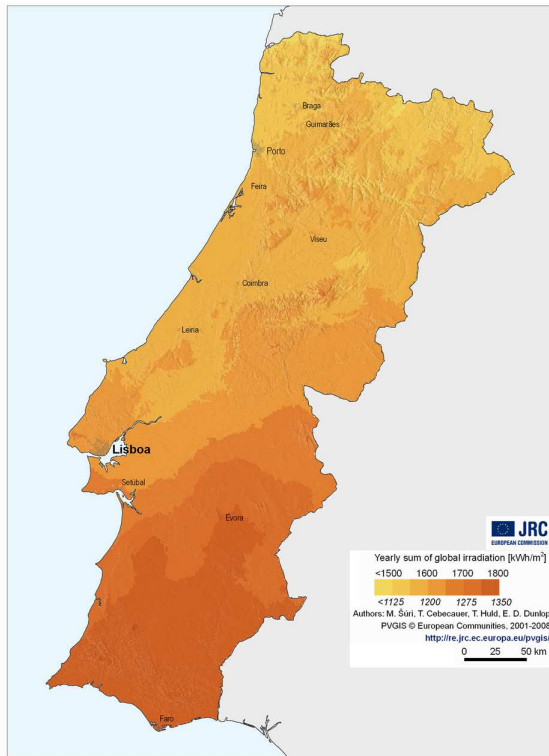
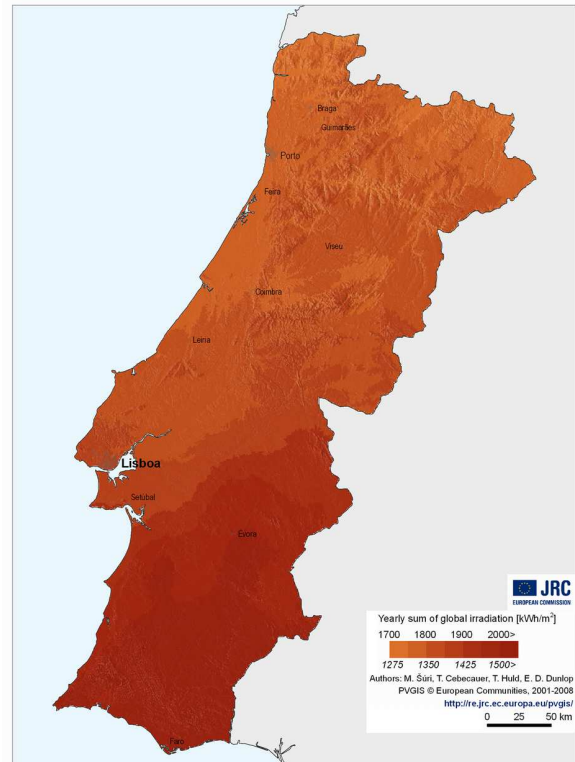


Figura 2.5: Irradiação global média sobre planos fixo e horizontal e inclinado

Interpretando os dados da Figura 2.5 e comparando os valores de irradiância, verifica-se que é com um plano fixo com inclinação de  $30^\circ$ , que se consegue a maximização deste valor, 8% superior comparativamente a um plano totalmente horizontal e 12% relativamente a um plano com  $60^\circ$ .



(a) Plano Horizontal



(b) Plano otimamente inclinado

Figura 2.6: Irradiação total anual e energia produzida por kW de fotovoltaico instalado [13]

Na Figura 2.6 apresenta-se o caso concreto de Portugal Continental, nos casos de disposição horizontal (Figura 2.6a) e para um plano otimamente inclinado (Figura 2.6b). Analisando as Figuras anteriores, verificamos que a radiação global incidente numa superfície horizontal varia entre os  $1400kWh/m^2$  e os  $1800kWh/m^2$ . Por outro lado, utilizando uma superfície otimamente inclinada, os valores incidentes podem variar entre  $1750kWh/m^2$  e os  $2050kWh/m^2$ [13].

### 2.2.3 Aumento da produção energética através do seguimento do movimento do Sol

Caso um sistema siga a posição do Sol, a energia produzida será maior. Nos dias com um maior índice de radiação, em que existe uma grande proporção de radiação direta, é possível obterem-se ganhos relativamente elevados de radiação através deste tipo de sistema. No Verão, não só os ganhos absolutos são muito superiores do que no Inverno, como também a proporção de dias nublados é significativamente inferior. Em dias sem nuvens, estes ganhos podem atingir até 50% nesta época (Verão) e 300 % no Inverno, quando comparados com os ganhos de sistemas fotovoltaicos com uma área de captação horizontal [5]. A maior parte do aumento da produção de energia, devido ao movimento do equipamento que permite seguir a deslocação do Sol, é obtida no Verão. Há dois tipos de dispositivos, que permitem o movimento dos equipamentos de acordo com a deslocação do sol: os que têm dois eixos e os de apenas um eixo. Os mecanismos com dois eixos, representados na Figura 2.7, funcionam sobre o plano vertical (entre  $-120^\circ$  e  $+120^\circ$ ) e o plano horizontal ( $60^\circ$ ) [14].

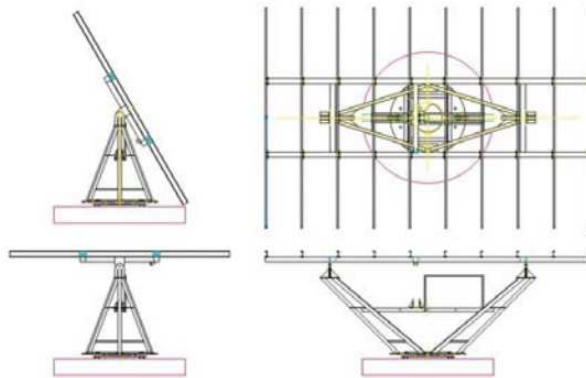


Figura 2.7: Sistema seguidor de dois eixos

Dado que os mecanismos de dois eixos são muito mais complexos (e dispendiosos) do ponto de vista técnico comparativamente aos sistemas de um eixo, são muitas vezes preteridos a favor destes últimos.

Os sistemas de seguimento solar de um único eixo (também designado por seguidor mono axial horizontal) operam sobre o eixo horizontal (entre a gama dos  $-45^\circ$  e  $+45^\circ$ ).



Figura 2.8: Sistema seguidor de um eixo [14]

A Figura 2.8 , apresentada anteriormente, é representativa do movimento horizontal realizado por um sistema seguidor de um eixo. Em termos de eficiência, no caso da Europa Central, os sistemas fotovoltaicos com dispositivos de dois eixos podem obter um aumento de produção adicional de até 35%, comparativamente a sistemas fixos. Nos dispositivos de um eixo, este possível ganho, teórico, queda-se pelos 30% [14]. A Figura apresentada de seguida representa as diferenças em termos de produção ao longo de um dia (Verão), dos diferentes tipos de sistema de produção de energia fotovoltaica.

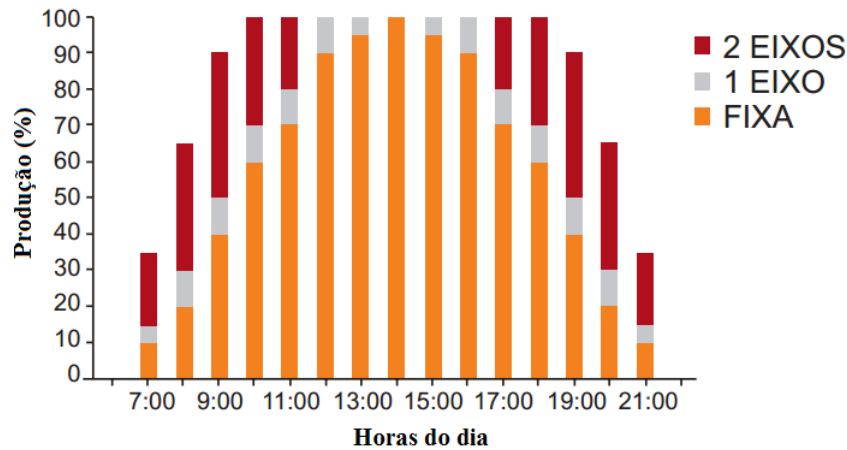


Figura 2.9: Comparação entre produções de diferentes sistemas (adaptado de [14])

Contudo, o uso de sistemas seguidores solares implica um custo mais elevado. Este tipo de sistemas requerem um mastro vertical regulável, que terá de ser capaz de resistir às grandes pressões do vento. Pode vir equipado com um sistema de controlo elétrico, ou ser movido através de meios hidráulicos. O facto de ser necessário a sua alimentação, reduz em parte a eficiência energética global do sistema. Os sistemas hidráulicos são baseados no princípio de aquecimento de líquidos e nas diferenças resultantes de pressão. Caso o mecanismo deixe de funcionar, o sistema fotovoltaico pode ficar imobilizado numa posição desfavorável, o que conduz a uma diminuição considerável da radiação captada durante o período de imobilização. Regra geral, o acréscimo de produção energética dos sistemas fotovoltaicos com este tipo de tecnologia não compensa o maior investimento inicial que resulta do mecanismo em causa (a determinação da veracidade desta afirmação é um dos objetivos desta dissertação). No entanto, o mercado tem vindo a adaptar e existe já uma ampla gama de sistemas seguidores com um eixo, com preços mais reduzidos, cujo custo/benefício se revela bastante compensatório.

## 2.3 PRIMEIRAS APLICAÇÕES DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O selênio teve a sua grande primeira aplicação nos finais do século XIX, não devido à sua propriedade fotovoltaica, mas à sua propriedade foto-condutora (corrente produzida ser proporcional à radiação incidente e dependente do comprimento de onda), o que permitia medir a intensidade da luz em fotografia. Esta ideia partiu do engenheiro alemão Werner Siemens que os comercializou como fotômetro para máquinas fotográficas. Outra grande aplicação deu-se nas décadas de 50 e 60, com a expansão espacial. A necessidade de uma fonte de energia inesgotável fez com que se apostasse nesta tecnologia para alimentação dos satélites [5]. Esta tecnologia contudo, apesar de cara, era muito leve, e dispensava o uso de baterias pesadas para a alimentação destes sistemas. A indústria espacial aliás, é considerada a grande responsável pelo desenvolvimento desta tecnologia. Esta tecnologia foi também utilizada em sistemas independentes como meio de fornecimento de eletricidade a localidades rurais remotas, em equipamentos de bombagem para irrigação agrícola, e em sistemas de telecomunicações que, devido à distância dos grandes centros populacionais/dificuldade de acesso a implementação de um sistema autónomo era vital e economicamente mais viável do que a ligação ao sistema elétrico tradicional. Nos dias de hoje, máquinas calculadoras, relógios, sinais de trânsito e parquímetros, são aplicações nas quais os sistemas fotovoltaicos são implementados em massa, em que o baixo consumo de energia não obriga à instalação de painéis solares de elevada dimensão.

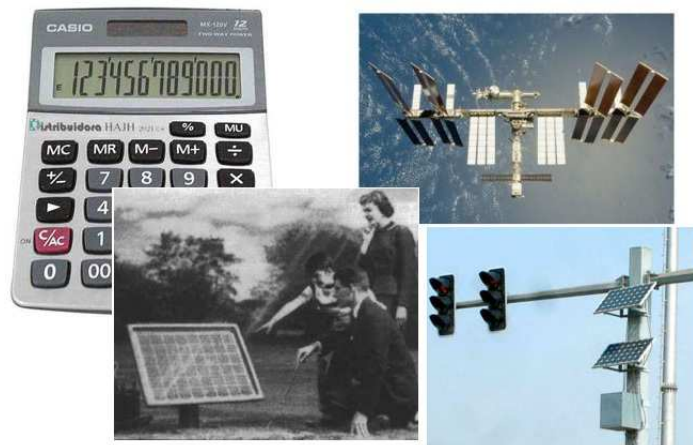


Figura 2.10: Exemplos de utilização da tecnologia solar

## 2.4 MATERIAIS UTILIZADOS

As células fotovoltaicas são constituídas por um material semicondutor – o silício – ao qual são adicionadas substâncias, ditas dopantes, por forma a ser criado um meio adequado ao estabelecimento do efeito fotovoltaico. Uma célula fotovoltaica tem uma potência elétrica de aproximadamente 1,5 W (correspondentes a uma tensão de 0,5 V e uma corrente de 3 A). Para a obtenção de potências maiores, células são associadas em série e/ou em paralelo, formando assim painéis fotovoltaicos com potências diversificadas potências (variando tipicamente entre 180 e 240W) [7]. Como forma de proteção são colocados díodos de *bypass*<sup>1</sup> por forma a evitar o sobreaquecimento de células quando parte do módulo se encontra à sombra. O conjunto de células é colocada entre uma superfície de vidro e diversas camadas de material plástico sendo submetidas a elevadas temperaturas e depressões por forma a tornar o conjunto estanque. Após isto, são montadas numa estrutura metálica (normalmente de alumínio).

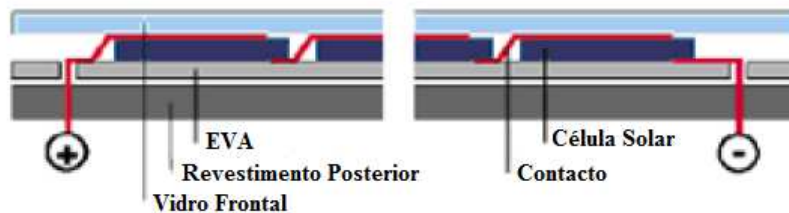


Figura 2.11: Constituição de um painel solar

A Figura 2.12 é representativa de como as células podem ser associadas por forma a aumentar a potência de saída de acordo com o desejado.

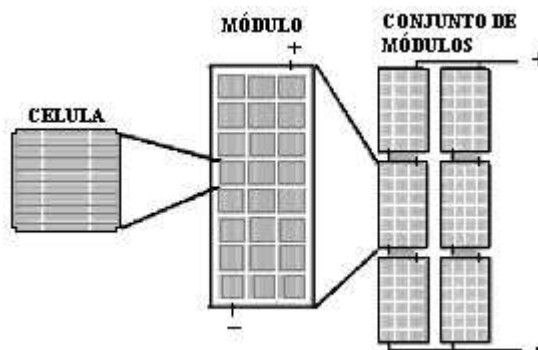


Figura 2.12: Agrupamento de células

Uma célula fotovoltaica constituída por cristais de silício puro não seria capaz de produz energia elétrica. Para haver corrente elétrica é necessário a criação de um campo elétrico, isto é, uma diferença de potencial entre duas zonas da célula (o que leva à necessidade de “alterar” a composição de uma célula de silício puro) – a dopagem do silício.

<sup>1</sup>Mais informação em <http://pveducation.org/pvcdrom/modules/bypass-diodes>

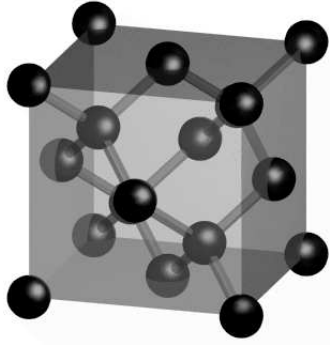


Figura 2.13: Estrutura de cristal de silício

Este processo consiste na introdução de elementos estranhos com o objetivo de alterar as suas propriedades elétricas, criando deste forma duas camadas na célula: a camada tipo p e a camada tipo n, que possuem, respetivamente, um excesso de cargas positivas (p) e um excesso de cargas negativas (n). Para a criação da região do tipo p utiliza-se o elemento boro (Br). Um átomo de boro forma quatro ligações covalentes com quatro átomos vizinhos de silício, mas como só apenas possui três elétrons na sua banda de valência, existe uma ligação livre, apenas com um elétron ao passo que as restantes três ligações possuem dois elétrons. A ausência deste elétron é considerada uma lacuna, a qual tem um comportamento de carga positiva que viaja através do material. A razão entre átomos de boro e átomos de silício é normalmente da ordem de 1 para 10 milhões [15]. Para criar a região n, o fósforo (P) é o composto utilizado. Um átomo de fósforo tem cinco elétrons na sua banda de valência, pelo que cria quatro ligações covalentes com os átomos de silício e deixa um elétron livre, que tal como o elétron livre de boro, viaja através do material. A razão entre átomos de fósforo e de silício é algo como 1 para 1000. A região onde os dois materiais se encontram, designa-se junção p-n, criando-se um campo elétrico que separa os portadores de carga que a atingem. Estas junções p-n levam a um comportamento fotovoltaico com melhor desempenho que as iniciais barreiras de Schottky. No início do desenvolvimento desta tecnologia (em 1954), uma junção p-n de sulfureto de cádmio foi produzida com uma eficiência de 6%, e nos anos seguintes foram desenvolvidas outras tecnologias de junções p-n, com arsénio de gálio, fosfato de índio e telúrio de cádmio, material interessante por apresentar uma elevada absorção, em pressuposições teóricas de um rendimento superior relativamente à junção p-n de silício. Contudo, o silício manteve-se como o material fotovoltaico mais utilizado e difundido, beneficiando das evoluções tecnológicas da indústria microelectrónica porém, a investigação e o desenvolvimento de estratégias para a construção de novos matérias e de equipamentos fotovoltaicos com um custo menor e nos existentes, para aumentar a sua eficiência têm vindo a ser explorados. Entre as inovações de redução de custos, referem-se o silício poli-cristalino, o silício amorfo bem como condutores orgânicos. Em termos de aumento de rendimento referem-se as junções foto eletroquímicas e ligações tandem (sobreposição

de várias células semicondutoras, cada uma otimizada para um dado comprimento de onda da radiação) bem como variações desta última. Apesar de em termos práticos não nos encontrarmos a fazer usufruto destes avanços tecnológicos, o conhecimento nesta ciência tem vindo a melhorar de dia para dia.

#### **2.4.1 Silício mono-cristalino**

O silício mono-cristalino é o material mais usado na composição das células fotovoltaicas, tendo uma cota de mercado de aproximadamente 60%. A uniformidade da estrutura molecular resultante da utilização de um cristal único é ideal para potenciar o efeito fotovoltaico. O rendimento máximo atingido em laboratório ronda os 24%, porém apenas se obtém cerca de 15% em condições de exterior [5]. O custo de produção de silício cristalino é muito elevado. Em 2007, na Universidade de Delaware, Estados Unidos, foi batido o recorde de eficiência energética das células solares cristalinas, tendo-se atingido um rendimento de 42,8% na conversão sob condições normais de iluminação [5].

#### **2.4.2 Silício poli-cristalino**

O silício poli-cristalino é composto por um número muito elevado de pequenos cristais da espessura de um cabelo humano, dispõe de uma quota de mercado de cerca de 30%. As descontinuidades da estrutura molecular dificultam o movimento de eletrões e encorajam a recombinação com os buracos, o que reduz a potência de saída. Por este motivo os rendimentos em laboratório e em utilização prática não excedem os 18% e 12%, respetivamente. Em contrapartida, o processo de fabricação é mais barato do que o do silício cristalino [5].

### 2.4.3 Silício amorfo

O silício amorfo não tem estrutura cristalina apresentando defeitos estruturais que, em teoria, impediriam a sua utilização em células fotovoltaicas, uma vez que aqueles defeitos potenciavam a recombinação dos pares de elétrons-buraco<sup>2</sup>. No entanto, se ao silício amorfo for adicionada uma pequena quantidade de hidrogénio, por um processo chamado hidrogenização, os átomos de hidrogénio são recombinados quimicamente de forma a minimizar os efeitos negativos dos defeitos estruturais. O silício amorfo absorve a radiação solar de uma maneira muito mais eficiente do que o silício cristalino, pelo que é possível depositar uma fina película de silício amorfo sobre um substrato (metal, vidro, plástico). Este processo de fabrico é ainda mais barato do que o do silício polycristalino. Os equipamentos solares domésticos (calculadoras, relógios) são habitualmente feitos com células de silício amorfo, representando cerca de 4% do mercado. Em laboratório é possível obter rendimentos da ordem de 13%, mas as propriedades conversoras do material deterioram-se em utilização prática, pelo que os rendimentos descem para cerca de 6%.

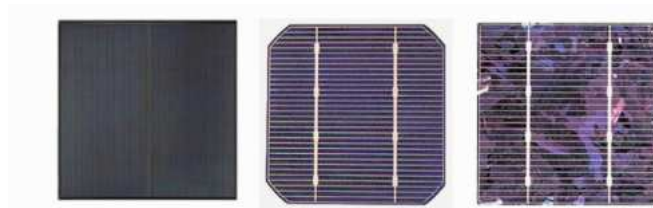


Figura 2.14: Diferentes tipos de células fotovoltaicas

Na Figura 2.14 apresenta-se, mais à esquerda uma célula de silício amorfo, ao centro uma célula de silício multi cristalino e à direita uma célula de silício poli cristalino. Na tabela 2.1 condensa-se a informação acima mencionada.

Tecnologia	$\eta_{célula-lab}$	$\eta_{módulo-lab}$	$\eta_{comercial}$	$Cota_{mercado}$
Silício mono-cristalino	24,7 %	22,7 %	13 % ~ 17 %	60 %
Silício poli-cristalino	19,8 %	18 %	11 % ~ 14 %	30 %
Silício Amorfo	12,7 %	13 %	5 % ~ 8 %	4 %

Tabela 2.1: Rendimento dos tipos de materiais usados em painéis fotovoltaicos (resumo da informação apresentada anteriormente)

<sup>2</sup>ausência de elétron na camada de valência

## 2.5 TECNOLOGIAS EMERGENTES E EM DESENVOLVIMENTO

As denominadas tecnologias fotovoltaicas de 1<sup>a</sup> geração são maioritariamente compostas por células de silício cristalino que se podem encontrar no mercado através de módulos mono-cristalinos e multi-cristalinos, ambos obtidos através do corte de um lingote de silício, puro no primeiro caso e uma mistura com múltiplos cristais no segundo.

A comunidade científica tem vindo a investigar e a desenvolver a utilização de outro tipo de compostos no fabrico de células FV que não o silício, mantendo o princípio de funcionamento semelhante porém sem grandes sucessos comerciais até à data.

Exemplos disso são as células compostas por Arseneto de Gálio (GaAs) e Fosforeto de Índio (InP) em que se conseguem eficiências superiores a 35% [37]. As principais desvantagens destes materiais residem na sua escassez e custo elevado, o que tem contribuído para que estas células sejam apenas utilizadas em projetos espaciais.

De igual modo, têm vindo a ser implementados em diversos locais, os denominados CPV (concentrados fotovoltaicos), que consistem não mais do que um sistema ótico com lentes de Fresnel<sup>3</sup>, que podem atingir até os 25% de rendimento na conversão [37].

### 2.5.1 Filmes finos

Módulos fotovoltaicos de filmes finos compostos por Telúrio de Cádmio (CdTe) e Cobre-Índio-Gálio-Selénio (Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>), vulgarmente designado por CIGS têm o potencial para alcançar o tão famigerado compromisso baixo custo/elevada eficiência na produção de eletricidade através de sistemas fotovoltaicos. Estas duas tecnologias partilham de uma composição estrutural idêntica, ao nível da camada de junção, da base de eletrões entre outras propriedades. A integração monolítica<sup>4</sup> dos circuitos das células solares pode conduzir a redução de custos de produção comparativamente aos custos de produção de silício cristalino. Para que se consiga alcançar o potencial a longo prazo destas duas tecnologias é necessário que se invista na investigação e desenvolvimento por forma a serem encontradas soluções para o alcance do objetivo pretendido.

Apesar de apresentarem já alguma fiabilidade, ainda restam problemas para resolver, tais como a degradação devido à exposição aos elementos naturais e o estudo da melhor forma para o seu encapsulamento. Relativamente a rendimentos, as células CIGS apresentam já uma eficiência de aproximadamente 19,5% e quando conjugadas em módulos ultrapassam os 13%. Embora apresentem resultados inferiores, as células de CdTe atingem já eficiências de 16,5% e 10% quando isoladas e inseridas em módulos, respetivamente [37].

---

<sup>3</sup>Homenagem ao cientista que criou uma lente lisa de um lado e com anéis concêntricos do outro que direccionam a luz para um determinado local

<sup>4</sup>Processo, extremamente complexo, que visa implementar a totalidade de um ou mais circuitos numa única peça de silício [19]

### 2.5.2 Células de multi-junção

As células fotovoltaicas multi-junção são uma subclasse de células fotovoltaicas constituídas por múltiplas camadas de películas finas produzidas por um processo de epitaxia<sup>5</sup>.

Cada tipo de semiconductor possui uma banda de energia específica, ou como se designa em inglês, "*band gap*"<sup>6</sup>, que lhe permite absorver, de um modo mais eficiente, parte do espectro da radiação eletromagnética. Como tal, os materiais presentes neste género de células são criteriosamente escolhidos por forma a captarem a energia da totalidade da amplitude de todo o espectro, produzindo assim uma maior quantidade mais elevada de corrente elétrica. As diferentes camadas encontram-se ligadas em série, estando o material com a "*band gap*" mais elevada no topo. O processo é relativamente simples: os fotões acima da "*band gap*" da primeira junção são absorvidos na primeira camada, enquanto os restantes vão passando para as camadas inferiores, onde são absorvidos de acordo com a sua "*band gap*" e assim sucessivamente até serem totalmente absorvidos.

Este tipo de células atingem já rendimentos de conversão de energia solar em energia elétrica de aproximadamente 38% [16].

Recentemente (2011), investigadores do Departamento de Energia dos EUA, mais concretamente do Laboratório Nacional Lawrence Berkeley anunciaram ter desenvolvido um processo de criação de células de alta eficiência de multi-junção através de um único material semiconductor. Este novo composto, uma mistura de índio e gálio, apresenta a vantagem de poder ser modificado por forma a ser sensível a diferentes comprimentos de onda. Outra vantagem reside no facto de o composto se encontrar disposto numa única camada. O novo material converte fotões de alta energia em eletricidade, sem desperdiçar a sua energia sob a forma de calor, convertendo de igual modo os fotões de baixa energia em energia, que com materiais diferentes não seriam absorvidos. Este processo é revolucionário pois permite o mesmo resultado do que nas células solares de multi-junção utilizando apenas uma camada. No fim de tudo, o mais impressionante na recente descoberta não é somente o facto de esta tecnologia apresentar eficiências de até 50% (contra os 15% das tecnologias mais difundidas no mercado) mas sim a possibilidade de que a nova célula poderá ser produzida utilizando as linhas de produção já existentes dos restantes semicondutores [17].

A Figura 2.15, a seguir apresentada demonstra a evolução sofrida na eficiência da conversão de energia solar em energia elétrica de algumas tecnologias fotovoltaicas desde o ano de 1975 e 2005.

---

<sup>5</sup>Do grego *epi*, "acima" e *taxis*, "de maneira ordenada". Refere-se ao processo de deposição de uma película monocristalina sobre um substrato mono cristalino com a mesma orientação.

<sup>6</sup>Determina a zona do espetro solar que uma célula fotovoltaica consegue absorver

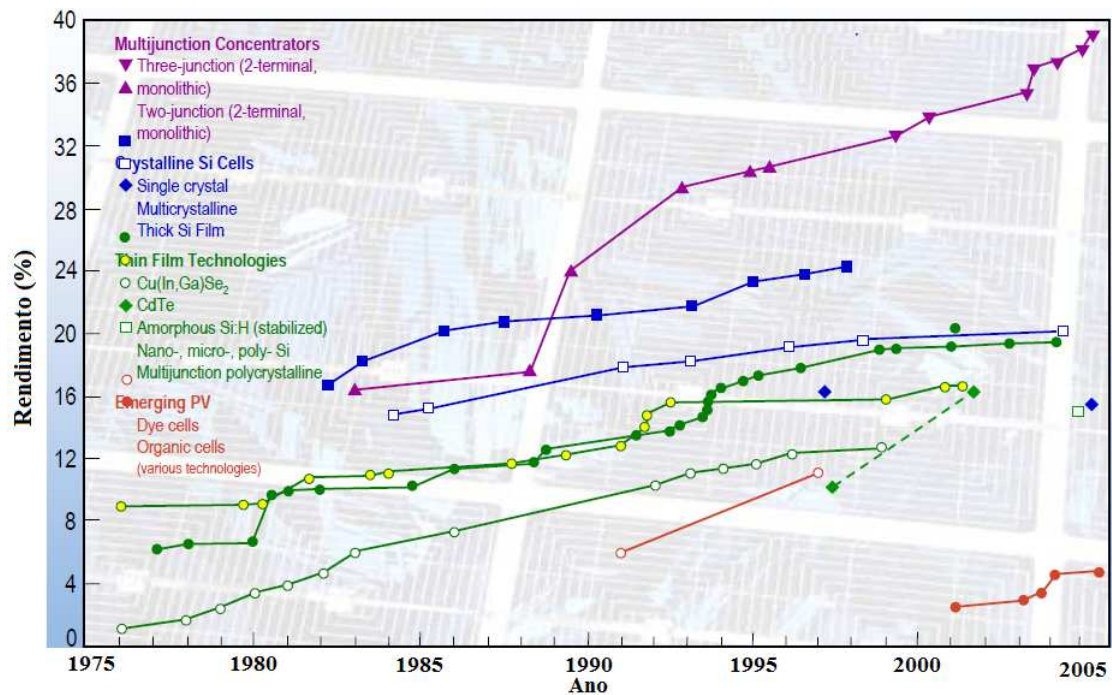


Figura 2.15: Evolução da eficiência de tecnologias fotovoltaicas (adaptado de [17])

Verifica-se que as técnicas de multi-junção apresentam valores de eficiência de conversão muito superiores às restantes tecnologias, pese embora esta se tenha conseguido destacar das restantes tecnologias a partir do início da década de 90. Apenas as tecnologias ditas "tradicionais", como o silício mono e poli cristalino, apresentam o 2º melhor rendimento como apresentado na Figura 2.15 .

### 2.5.3 Células de concentração

Concentradores Solares, Concentrating Solar Power (CSP), é como é vulgarmente conhecida esta tecnologia. Esta tecnologia gera energia elétrica com reduzidas emissões de gases com efeito de estufa. Ao contrário dos tradicionais sistemas fotovoltaicos, estes sistemas de concentração têm capacidade de armazenar energia (calorífica) por um curto período de tempo, o que permite uma produção de energia elétrica desfasada no tempo em relação à sua captação. É também possível utilizar sistemas auxiliares energia por foram a produzir energia até quando não exista luz solar, o que permite o fornecimento e despacho de energia para a rede quando necessário. Por estas e por outras características a tecnologia CSP é vista como uma tecnologia promissora para todas as regiões. Dado as suas características é vista como uma tecnologia que permite integrar nas redes energéticas diversos tipos de energia renovável, tal como solar ou eólica, sendo enumerados alguns dos diferentes tipos de concentradores [1].

**Concentradores parabólicos cilíndricos** São os sistemas mais simples de concentradores parabólicos. A sua forma é cilíndrica e diferencia-se dos concentradores planos pela particularidade de concentrar a radiação incidente antes de esta chegar ao tubo de absorção. Um concentrador parabólico cilíndrico é constituído por uma superfície espelhada encurvada de forma parabólica cuja função é concentrar os raios solares incidentes num tubo de absorção. Neste tubo circula o fluido, aquecido por convecção natural que após atravessar o tubo de absorção é encaminhado para um permutador de calor, que permite trocas de calor entre o fluido e água que se encontra armazenada num tanque de armazenamento térmico. Apresenta como desvantagens um baixo rendimento na conversão da energia solar em energia elétrica e é difícil acoplar sistemas de armazenamento de energia a este tipo de sistemas. Por agora, a maior limitação destes equipamentos prende-se com o facto de apenas conseguir captar radiação direta o que, ao contrário dos restantes coletores, não permite fazer uso da radiação difusa.

De forma a minimizar a incapacidade de captar radiação difusa, é incluído neste equipamento um sistema que permite variar a posição do painel consoante a localização do fonte solar, aumentando a performance do concentrador [1].

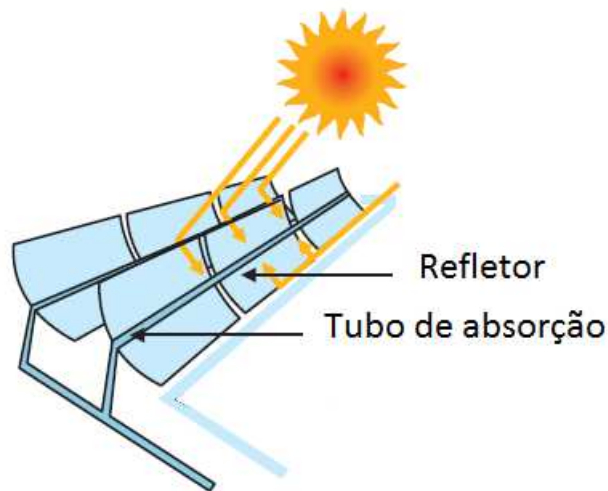


Figura 2.16: Concentrador parabólico cilíndrico [1]

**Concentradores parabólicos "Dish Collectors"** Este tipo de concentrador tem uma forma similar a um grande satélite, sendo constituído por uma superfície parabólica, geralmente em alumínio ou prata, que reflete a radiação incidente para uma outra superfície de absorção mais pequena, a que se dá o nome de *Focus*, devido à sua localização no ponto focal. A vantagem destas superfícies refletoras prende-se com o seu baixo custo, fácil limpeza e uma durabilidade bastante aceitável.

A maioria destes sistemas possuem um motor independente do tipo Stirling<sup>7</sup> no ponto de focagem colocado normalmente na superfície de absorção por trás do ponto focal para reduzir, em certa parte, a radiação incidente.

O recetor térmico pode ser formado por uma série de tubos com líquidos refrigerantes, sendo os mais usuais hidrogénio ou hélio. Estes tanto podem ser o meio de transferência de calor como podem também ser o fluido que fornece trabalho para um motor. Estes coletores têm uma razão de concentração muito elevada, tendo por isso, comparativamente às outras tecnologias deste tipo, as maiores eficiências na conversão de energia solar em energia térmica ou até mesmo em energia elétrica. É um sistema de elevada eficiência, autónomo e híbrido (pode funcionar a energia solar ou através combustíveis fósseis) e é caracterizado por uma eficiência de conversão de energia solar em eletricidade de cerca de 30%, uma das mais elevadas utilizando esta técnica de aproveitamento de recursos renováveis.

Em termos de impactos ambientais, nomeadamente para sistemas de produção de eletricidade, estes são muito reduzidos, mesmo quando os motores funcionam com combustível fóssil. A emissão de poluentes é reduzida bem como o ruído provocado pelo movimento dos motores [1].

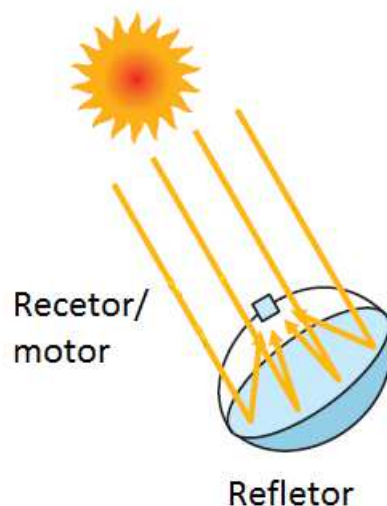


Figura 2.17: Concentrador "dish collector" [1]

---

<sup>7</sup> Criado pelo pastor escocês Robert Stirling em 1816 com o objetivo de substituição do motor a vapor em função da débil tecnologia metalúrgica das caldeiras. Caracteriza-se por um ciclo termodinâmico composto de 4 fases e executado em 2 tempos do pistão: compressão isotérmica (temperatura  $c^{te}$ ), aquecimento isocórico (volume  $c^{te}$ ), expansão isotérmica e arrefecimento isocórico

**Torres de Concentração** As torres solares de concentração de radiação solar servem para gerar potência elétrica através de luz solar, a qual é focada num permutador de calor (recetor de radiação) montado no topo desta. Estes sistemas são constituídos por centenas e por vezes milhares de refletores/helióstatos, cujo nome técnico é helióstato, cuja função é refletir a luz incidente para a placa de absorção a qual atinge temperaturas que variam entre os 500°C e os 1500°C. Estas aplicações são extremamente viáveis quando são necessárias potências na ordem dos 30 a 400 MW. Estes concentradores podem utilizar como fluido refrigerante a água e sal fundido líquido. A diferença e consequente vantagem entre as duas opções existentes até ao momento deve-se ao facto de se poder armazenar calor de modo a prevenir os períodos de céu nublado e os períodos não solares aquando da utilização do sal fundido dado que é constituído por 60% de  $NaNO_3$  (nitrato de sódio) e 40% de  $KNO_3$  (nitrato de potássio) cuja temperatura de fusão é de 700°C e se encontra num estado de líquido saturado a uma temperatura de 1000°C. Consequentemente, este é armazenado até ser necessária produção de energia elétrica. Neste caso o sal aquecido é levado para um sistema de geração de vapor que produz vapor sobreaquecido, o qual irá alimentar uma turbina/gerador para produção de eletricidade - Ciclo de *Rankine*.

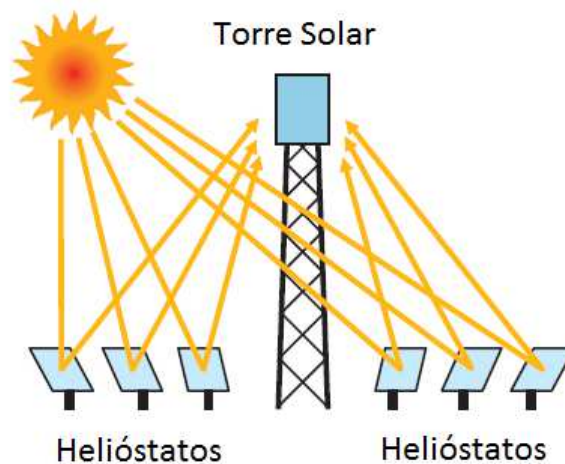


Figura 2.18: Torre solar de concentração [1]

A importância dada a esta tecnologia é tão evidente que são já elaborados relatórios com projeções mundiais relativamente à produção de energia, que se apresenta na tabela 2.2.

Países	2020	2030	2040	2050
Austrália, Ásia Central, Chile, México, África, EUA	5%	12%	30%	40%
Estados Unidos (remanescente)	3%	6%	15%	20%
Europa (maioritariamente importador), Turquia	3%	6%	10%	15%
África (remanescente), Argentina, Brasil	1%	5%	8%	15%
China, Rússia (importação)	0,5%	1,5%	3%	4%

Tabela 2.2: Eletricidade proveniente de parques CSP no total de consumo de eletricidade

A tabela anterior é reveladora da "esperança" que se deposita nesta tecnologia como uma alternativa viável aos combustíveis fósseis bem como uma feroz concorrente aos tradicionais sistemas fotovoltaicos [7].

## 2.6 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O presente capítulo pretende dar a conhecer as diferentes configurações possíveis de sistemas fotovoltaicos: isolados, híbridos e ligados à rede. Como mencionado neste documento, os primeiros sistemas a serem utilizados foram os isolados. Com o aperfeiçoamento da tecnologia e de políticas adotadas pelas entidades governamentais, começaram a surgir os primeiros sistemas conectados à rede e sistemas híbridos.

### 2.6.1 O equipamento

**Painel Solar** Os módulos podem ser ligados em série ou em paralelo. Ligando em série, a conexão é realizada ligando o pólo positivo de um módulo ao pólo negativo do seguinte e assim sucessivamente. A corrente total do conjunto é igual à corrente de um módulo, porém a tensão do conjunto é igual à soma da tensão de cada um dos módulos do conjunto:

$$I_{total} = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

$$V_{total} = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

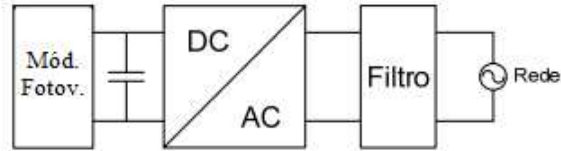
Por outro lado, na ligação em paralelo, a ligação dos módulos é efetuada ligando o pólo positivo de um módulo com o positivo do módulo seguinte e a saída é feita ligando o pólo positivo e o negativo do último modo do conjunto em paralelo. A corrente total do conjunto é igual à soma das correntes de todos os módulos interligados e a tensão do conjunto é igual à tensão de cada um dos módulos do conjunto:

$$I_{total} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

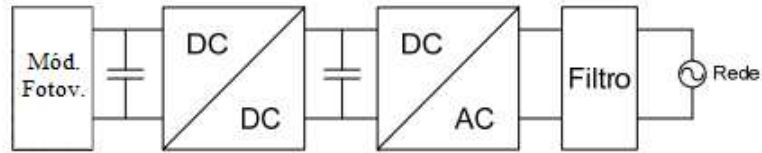
$$V_{total} = V_1 = V_2 = \dots = V_n$$

O número de módulos que podem ser ligados em cada um dos dois tipos está dependente do tipo de módulo utilizado e da gama de tensão que o inversor escolhido para o sistema permita.

**Inversor** O inversor de corrente contínua para corrente alternada é o equipamento responsável por efetuar a conversão de, como o nome indica, de uma corrente contínua para uma corrente alternada com sincronismo de tensão e frequência por forma a poder alimentar os equipamentos (em casa a maior parte dos nossos eletrodomésticos são do tipo AC). São também necessários para ligar uma instalação fotovoltaica à rede elétrica. De seguida é apresentado o diagrama de blocos (simplificado) do princípio de funcionamento dos inversores.



(a) Diagrama blocos inversor de um andar



(b) Diagrama blocos inversor de dois andares

Figura 2.19: Diagrama de blocos de inversores para conexão à rede

O conversor DC-DC que é apresentado na Figura 2.19b é utilizado quando se pretende elevar o nível de tensão fornecido pela string (ou painel individual) fotovoltaico, podendo este conversor ser retirado quando não é necessária esta função (2.19a).



Figura 2.20: Exemplos de inversores existentes no mercado

**Estrutura de Suporte** São construídos em material resistente a ações do vento de até 140 km/h e em material resistente à corrosão, tal como aço galvanizado a quente e/ou alumínio sendo normalmente unidos por intermédio de parafusos com porcas, por forma a evitar efeitos da degradação por exposição à intempérie.

### 2.6.2 Sistemas autónomos

Sistemas autónomos são sistemas de produção e de consumo de energia elétrica sem ligação à rede pública. Os sistemas autónomos/isolados foram o primeiro campo de operação económica dos sistemas FV. É comum encontrar este tipo de sistemas onde não se verifica a existência alimentação da energia por parte da rede (exemplo disto são as zonas rurais). Este tipo de sistemas têm já, e poderão desempenhar ainda mais nos tempos próximos um papel fundamental para a introdução de energia elétrica em países em vias de desenvolvimento, onde existem grandes áreas sem for-

necimento de energia elétrica [10]. De facto, um estudo elaborado pelo IEA [18], revela que no mundo existem aproximadamente mais de 1,3 biliões de seres humanos sem acesso a eletricidade. As situações mais críticas são na África subsariana – região situada a sul do Sara, e na Ásia subdesenvolvida - que representam 95% da população mundial que ainda vive no escuro. A remanescente população, segundo o mesmo estudo, encontra-se concentrada em áreas rurais. A capacidade de armazenamento dos sistemas isolados é bastante importante pois a energia produzida que não é necessária durante o dia é armazenada para ser utilizada nos períodos em que não existe produção.

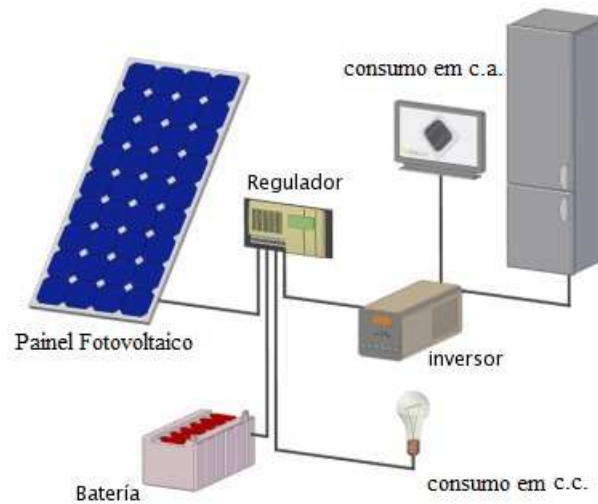


Figura 2.21: Configuração de um sistema isolado da rede [19]

### 2.6.3 Sistemas híbridos

Este tipo de sistemas tem o seguinte princípio de funcionamento: a produção obtida pelo sistema fotovoltaico é utilizada para fornecer energia à instalação a qual se encontra ligada permitindo ao utilizador ficar "isolado" da rede caso o seu consumo seja inferior ao produzido pelo sistema fotovoltaico e caso a energia consumida seja inferior à produzida pode vendê-la ao distribuidor de energia, caso não disponha de um sistema de armazenamento de energia (baterias). Durante a ausência de produção de energia ou em caso de insuficiência na geração, poderá consumir exclusivamente a energia fornecida pelo distribuidor de energia. Desta forma, a contribuição da energia solar reduz os custos da fatura elétrica para o proprietário do sistema, enquanto que a eletricidade excedente pode ser vendida à rede, contribuindo assim para o fornecimento de energia à comunidade onde se encontra inserido. O esquema seguinte, em diagrama de blocos, representa o modo de funcionamento de um sistema híbrido.

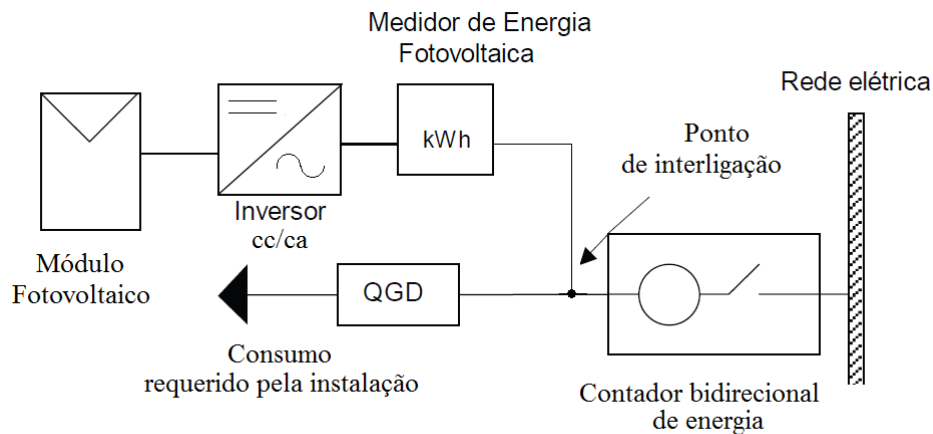


Figura 2.22: Composição de um sistema híbrido

#### 2.6.4 Sistemas ligados à rede

Os sistemas ligados à rede de distribuição são mais simples e mais baratos para a mesma potência, comparativamente aos sistemas isolados, pelo facto de dispensarem as baterias de acumuladores. Os inversores para ligação à rede têm características específicas ao nível da segurança, pois caso haja uma quebra de tensão por parte da rede, o inversor é automaticamente desligado por forma a evitar a injeção de energia nessas circunstâncias.

Existem sistemas conetados à rede desde os poucos kW (micro geração) até a grandes sistemas de produção, na ordem dos MW. Por este facto, em ambiente doméstico terão de existir dois contadores de energia: o contador de injeção na rede (produtor) e o contador da receção (do consumidor), como se pode ver pela Figura 2.23 [12].

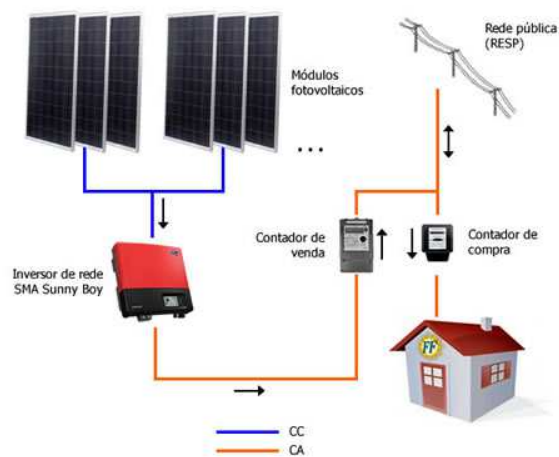


Figura 2.23: Constituição de um sistema de micro geração conetado à rede [19]

## 3 A ENERGIA FOTOVOLTAICA EM PORTUGAL

### 3.1 ANÁLISE ENERGÉTICA

Na União Europeia, Portugal é, depois da Grécia e da Espanha, o país com maior potencial de aproveitamento de energia solar. Com mais de 2300 horas/ano de insolação na Região Norte e 3000 horas/ano na Região Sul [20], o nosso país dispõe de uma situação privilegiada para o desenvolvimento deste tipo de energia, que não se tem no entanto, verificado. Por razões geográficas, os principais países produtores encontram-se localizados em latitudes médias e altas. O maior produtor mundial é a Alemanha (com 5,4 GWp instalados), seguido da Espanha (3,3 GWp), Japão (com 2 GWp) e Estados Unidos (1,2 GWp) [21]. Apesar da presente massificação desta tecnologia, são diversas as adversidades/entraves que pesam no momento de investir no sector fotovoltaico. Um avultado investimento inicial, insuficiência/falta de adequabilidade dos incentivos que têm vindo a ser atribuídos, carência de regulamentação específica e normas de qualidade aplicadas aos instaladores e aos equipamentos são alguns dos contratempos encontrados, o que naturalmente dificulta o desenvolvimento de aplicações fotovoltaicas no nosso país. Até finais da década de 90 (1997) não existiam registos do número de instalações fotovoltaicas existentes, por inexistência de uma entidade com essa finalidade. Pela Figura 3.1, verifica-se que a implementação destes sistemas, entre os anos de 1992 e 2004, se destinavam quase exclusivamente às localidades rurais (sistemas domésticos), e a sistemas não domésticos, tais como sistemas de telecomunicações, bombagem de água e iluminação [22].

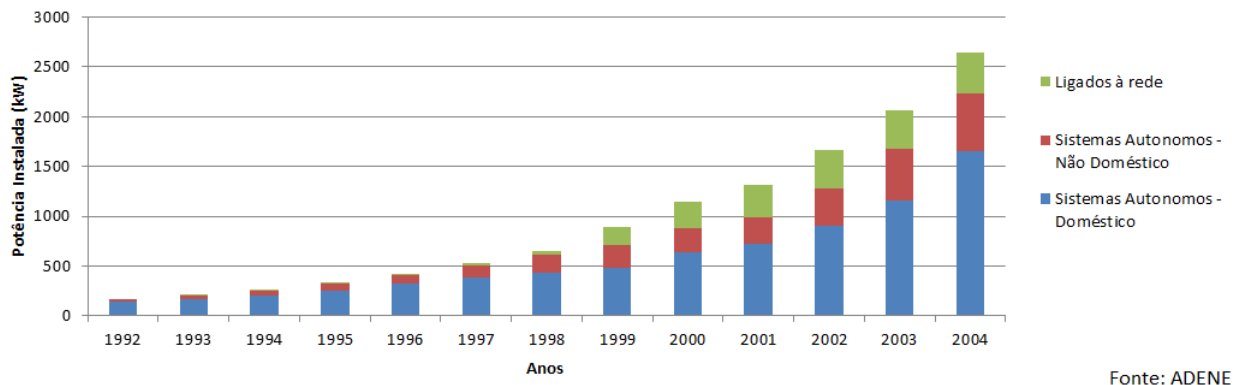
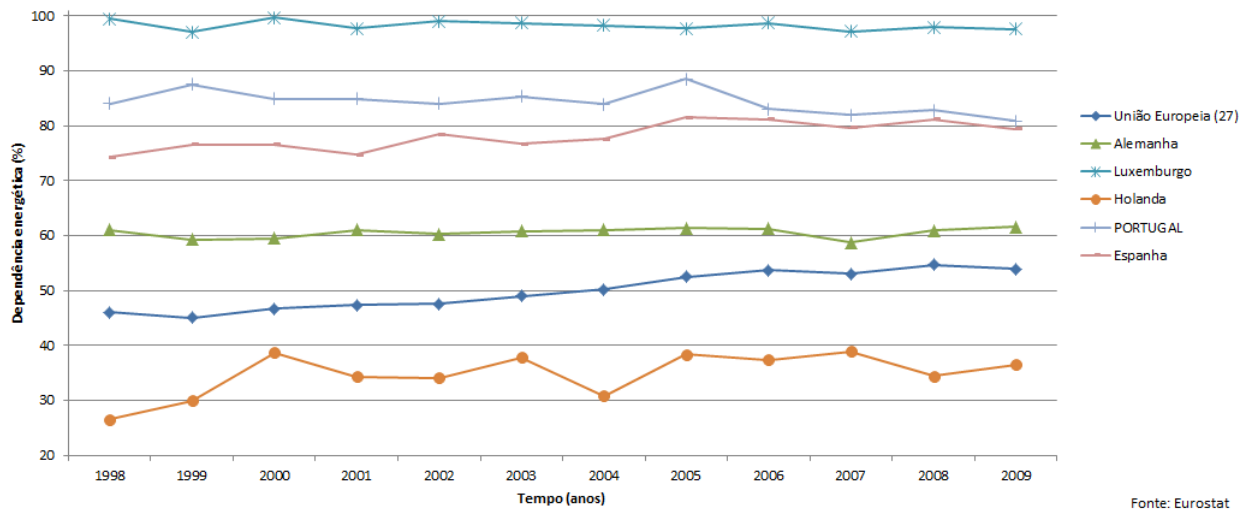


Figura 3.1: Primeiras aplicações dos sistemas fotovoltaicos em Portugal (1992-2004)

É facilmente observável um crescente número de sistemas conectados à rede de distribuição, bem como o aumento de aplicações destinadas a sistemas quer domésticos quer não domésticos. Esta é, aliás, uma tendência que ainda se verifica nos dias de hoje: 52% dos sistemas instalados encontram-se associados ao sector doméstico e 20% no sector dos serviços (sobretudo na área das telecomunicações).

No sector doméstico, os sistemas fotovoltaicos são bastante úteis, pois dão o seu contributo aos edifícios através da alimentação dos sistemas de iluminação e de ventilação. Em 1991 o abastecimento de energia primária de Portugal dependia do exterior em cerca de 88% e só o petróleo (totalmente importado) representava cerca de 71% do consumo de energia primária. A eletricidade de origem hídrica e resíduos florestais (incluindo os resíduos vegetais) eram as duas únicas fontes de energia primária nacionais utilizadas a um nível significativo (representavam respetivamente 4,7% e 7,0%

do consumo total), ao passo que o carvão (96% importado) tinha uma participação de 17,5%, valor que se pretende reduzir drasticamente nos próximos anos [21]. De facto, esta é uma tendência que se tem vindo a repetir ano após ano. Na Figura 3.2, a seguir apresentada, verificamos que o consumo de energia em Portugal se mantém historicamente e sistematicamente muito acima da média europeia, apenas sendo ultrapassado nos países apresentados pelo Luxemburgo.



Fonte: Eurostat

Figura 3.2: Dependência energética dos países da UE (1998-2009) (adaptado de [23])

De acordo com a Diretiva Comunitária relativa à produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis, a produção em 2010, de energia elétrica a partir de fontes renováveis que não a energia eólica e as mini-hídricas em Portugal, deveria ter sido de 1200 MW. A taxa de crescimento anual deste sector (fotovoltaico) está presentemente situada em 25%, o que representa que no ano de 2010, Portugal conseguiu uma contribuição de cerca de 10 MWp [24]. Como podemos observar na Figura 3.3, a tendência para a incorporação de energias de fontes alternativas tem aumentado de ano para ano.

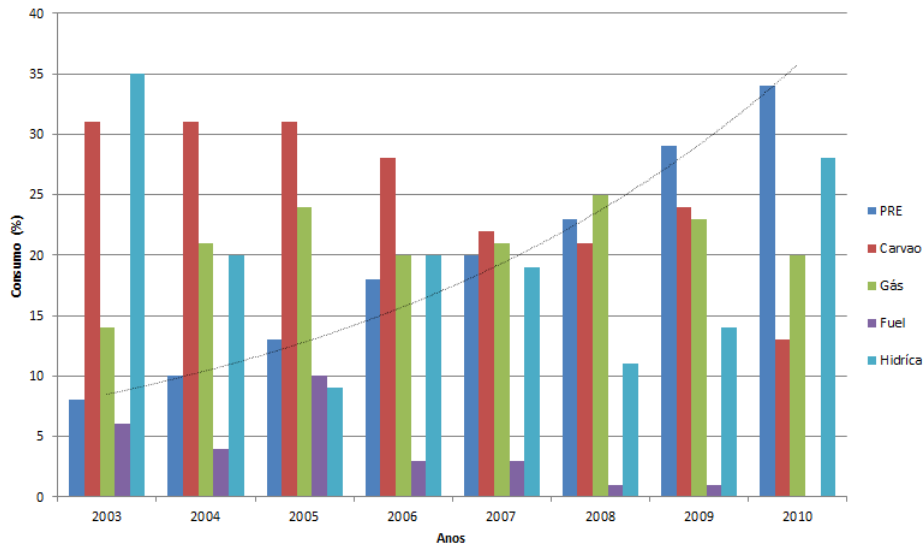


Figura 3.3: Recursos utilizados para produção de energia elétrica em Portugal (adaptado de [24])

Ainda no seguimento da Diretiva Comunitária, a título indicativo, Portugal apresentou o compromisso de ter como meta no ano de 2010, 39% de energia elétrica produzida a partir de fontes de energia renováveis, no contexto do consumo bruto nacional de eletricidade. Apesar de se tratarem de objetivos muito ambiciosos, dados da REN relativos a 2010 evidenciam que 34% da energia produzida em território português, é proveniente de PRE (produção de regime especial) o que é revelador do esforço que tem vindo a ser desenvolvido ao nível da produção energética [24]. Segundo dados retirados de [27], Portugal tinha instalado, no final de 2009, 102MW de potência instalada em instalações fotovoltaicas.

### 3.1.1 Evolução do número de instalações em Portugal

A Figura 3.4, apresentada de seguida, revela o número de novos registos por região do país, solicitados ao longo dos últimos anos (2008 a 2011) desde que [25] foi criado para o efeito. Os dados relativos a 2012 não foram incluídos visto que apenas se encontram disponíveis dados até ao mês de Maio.

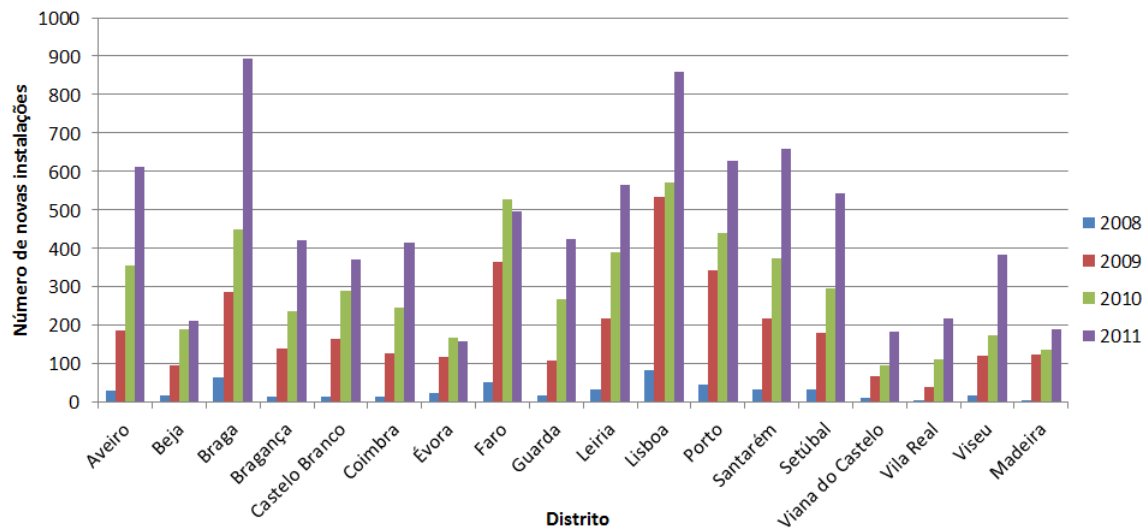


Figura 3.4: Distribuição geográfica de instalações de micro-geração [25]

Pela Figura apresentada, é observável um aumento considerável do número de instalações registadas no programa de micro-geração criado pelo governo português. Os locais onde se registou um maior número de instalações foram Braga, Lisboa e Porto. É de salientar que são os locais onde existe uma maior densidade populacional ( $311 \text{ hab}/\text{km}^2$ ,  $773 \text{ hab}/\text{km}^2$  e  $743 \text{ hab}/\text{km}^2$  respetivamente) e que se encontram localizados junto ao litoral e são considerados os grandes centros/motores económicos do país.

### 3.1.2 Evolução da potência instalada em Portugal

A Figura 3.5 representa a potência acumulada instalada em sistemas de micro-geração fotovoltaica, no período de tempo compreendido entre 2008 e 2011, segundo dados fornecidos por [25].

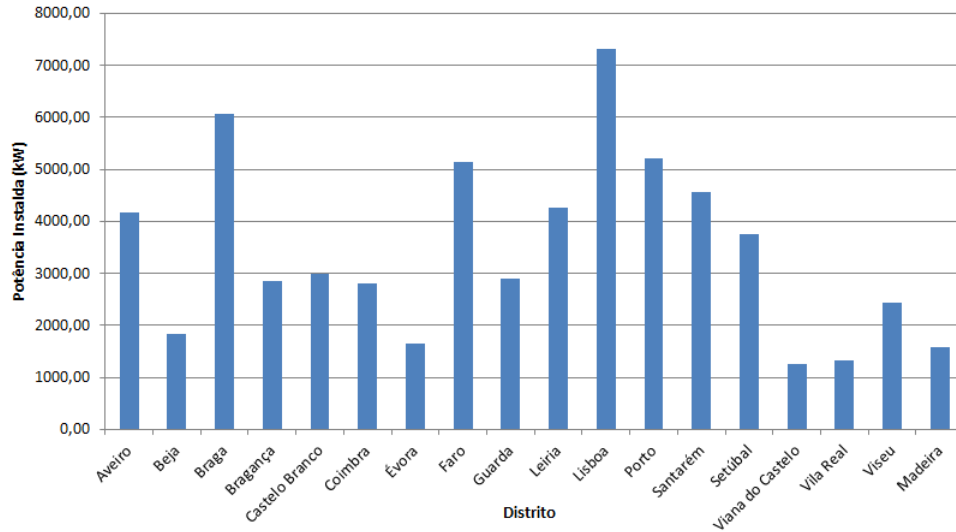


Figura 3.5: Potência instalada acumulada em instalações de micro-geração fotovoltaica

Pela análise da Figura 3.5, os locais onde foram instalados um maior número de instalações fotovoltaicas situam-se junto ao mar e nos grandes centros urbanos. Apesar de ser algo expectável devido à maior industrialização destas regiões e a uma população numerosa, veja-se, a título exemplificativo, a região de Beja, um dos locais com maior índice de exposição solar do nosso país e com uma área sensivelmente 250% maior que o distrito de Braga. Contudo, apresenta apenas 30% da potência instalada em sistemas de micro-geração fotovoltaica comparativamente com esta zona do país, o que é revelador do desaproveitamento do potencial energético disponível no nosso território. Segundo os dados disponíveis em [25], encontram-se registadas 19682 unidades de instalações de fotovoltaico ao abrigo da micro produção , perfazendo uma potência instalada em sistemas de micro geração de 69,97 MW.

### 3.1.3 Integração da produção fotovoltaica na rede elétrica nacional

Verifica-se um aumento considerável da energia com origem fotovoltaica a partir de 2007/2008 o que coincide com o início do programa de micro geração de Portugal. Esta crescente integração resulta do aumento de sistemas fotovoltaicos ligados à rede elétrica em Portugal, que se apresenta na Figura 3.6.

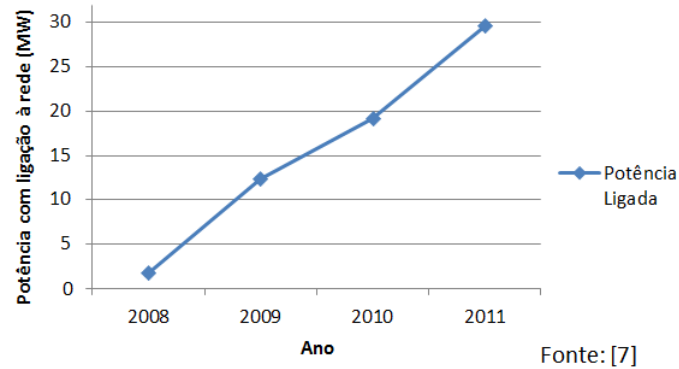


Figura 3.6: Potência com origem no fotovoltaico conetada à rede (adaptado de [24])

Também aqui se verifica um grande aumento ano após ano, o que se revela um bom indicador da recetividade que estes sistemas estão a ter bem como a capacidade que a rede tem para a absorver a energia produzida.

## 3.2 ANÁLISE ECONÓMICA

### 3.2.1 Evolução do custo da tecnologia fotovoltaica

O custo de investimento em sistemas fotovoltaicos é normalmente expresso em custo por watt de pico ( $\text{€}/\text{Wp}$ ). Em termos históricos, o preço dos módulos fotovoltaicos tem vindo a decrescer a um ritmo considerável. Como se pode ver na Figura 3.7, que representa a curva de preço/volume de vendas, observa-se que esta tem uma inclinação francamente descendente, sofrendo o preço dos módulos fotovoltaicos uma redução de 20% cada vez que a volume de vendas dobra o seu valor [26]. Esta descida tem vindo a ser acentuada cada vez mais devido ao aparecimento de novas tecnologias que leva à queda de preço das suas antecessoras, o aperfeiçoamento das linhas de produção e das técnicas de fabrico deste tipo de tecnologia, o aparecimento de diversos fabricantes e do efeito da natural concorrência a que está associada essa multiplicação de oferta.

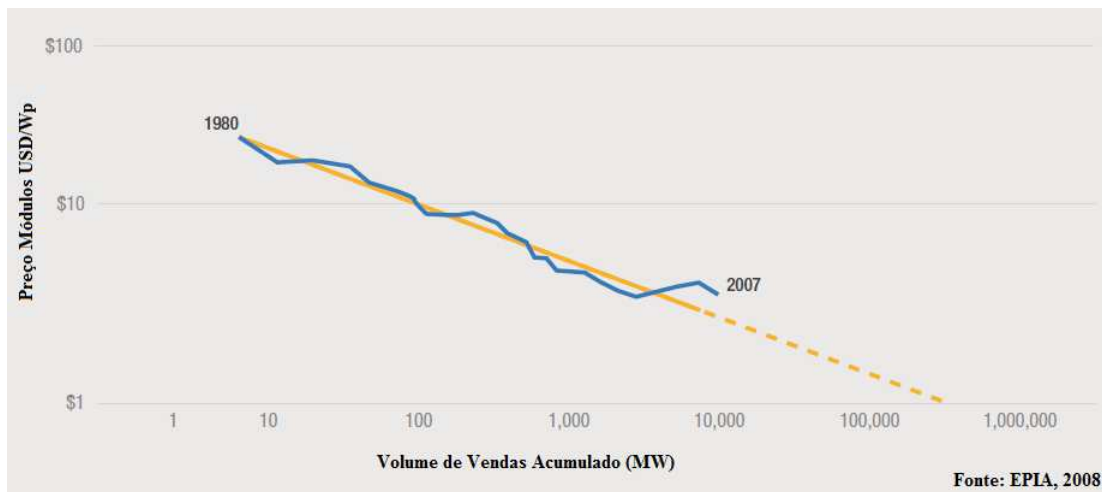


Figura 3.7: Evolução do custo de módulos fotovoltaicos [26]

Relativamente à tendência dos preços dos diferentes componentes de sistemas fotovoltaicos, é apresentada na Figura 3.8a evolução dos mesmos.

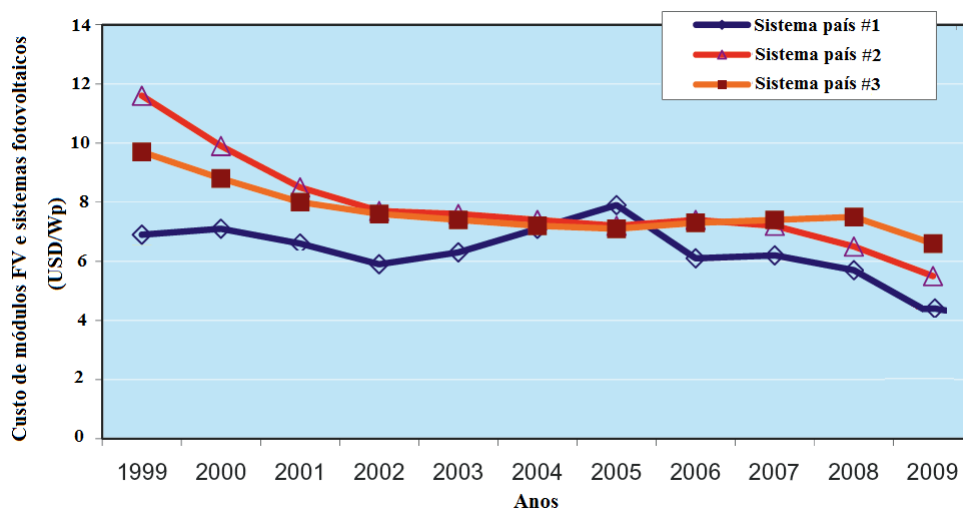


Figura 3.8: Evolução custo de sistemas fotovoltaicos (adaptado de [27])

O custo do sistema completo encontrava-se, à data de 2009, entre 4 e 8 USD/Wp (aproximadamente 3 e 7 €/Wp) [27]. Verificou-se uma grande diminuição no espaço de uma década, o que evidencia a evolução desta tecnologia. Embora o custo dos equipamentos de interface e regulação possam variar muito, tal como os custos de instalação, em termos médios, cerca de 60% do investimento total é referente aos painéis solares incluindo-se no valor remanescente o custo do equipamento de regulação, de controlo, eletrificação e custos administrativos.

### 3.2.2 Legislação e tarifas em Portugal

Com o passar dos anos, foram diversos os planos propostos pelo governo português por forma a tornar economicamente viável este tipo de tecnologia para os pequenos produtores. De seguida referem-se alguns como os mais importantes para o impulsionar desta tecnologia em Portugal.

**Programa E4** As ações e metas previstas no âmbito do “Programa E4”, Resolução do Conselho de Ministros Nº 154/2001, de 27/11, organizam-se num contexto de uma estratégia nacional que passa pelas fontes de energia renovável (FER), por forma a conseguir atingir com satisfação os desafios que o País se propôs a atingir, nomeadamente no que se refere à duplicação da disponibilidade de potência e de energia elétrica de origem renovável, num período de 10 a 15 anos. Dentro das medidas previstas pelo E4 é de destacar o nacional interesse no âmbito da tecnologia fotovoltaica, a importância da agilização do acesso e incentivo ao rápido desenvolvimento da produção de energia elétrica a partir das FER, a promoção das FER com potencial a médio prazo (com destaque para a energia fotovoltaica) e uma particular atenção à micro-geração de eletricidade a partir da energia solar fotovoltaica. A quota disponibilizada para esta tecnologia foi de 50 MW.

**Resolução do Conselho de Ministros Nº 63/2003** Esta Resolução do Conselho de Ministros, revogou a Resolução do Conselho de Ministros Nº 154/2001, de 19 de Outubro, que aprovou o Programa E4. Neste documento, o Governo Português definiu que a política energética Portuguesa assentava em três eixos estratégicos, e num dos quais se destacava a necessidade de assegurar a segurança do abastecimento Nacional e fomentar um desenvolvimento sustentável. A meta de 50 MW traçada pelo E4 para a área da energia fotovoltaica, foi ampliada para 150 MW.

**Diplomas Publicados** Entre os diplomas já publicados em Portugal com especial interesse para a produção de energia elétrica a partir das FER, e com especial interesse no âmbito de intervenção do presente documento – produção de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos, temos os seguintes Decretos Lei e Portarias mais significativos.

**Decreto-Lei 313/95 de 24 de Novembro** Estabelece no âmbito do SEI, o regime jurídico do exercício de atividade de produção de energia elétrica em aproveitamentos hidroelétrico, bem como da produção de energia elétrica a partir das FER.

**Decreto-lei Nº 168/99 de 18 de Maio:** Revê o regime aplicável à atividade de produção de energia elétrica, no âmbito do Sistema Elétrico Independente (SEI), baseado na utilização de recursos renováveis. A presente legislação estabeleceu uma tarifa diferenciada para a entrega de energia elétrica na rede pública de distribuição. Regula a atividade de produção de energia elétrica integrada nos termos do Decreto-Lei nº182/95, de 27 de Julho.

**Decreto-Lei Nº 312/2001 de 10 de Dezembro** Vem definir o novo regime de gestão da capacidade de receção de energia elétrica nas redes do Sistema Elétrico de Serviço Público, proveniente de centros electroprodutores do Sistema Elétrico independente.

**Decreto-Lei Nº 339 - C/2001 de 29 de Dezembro** Atualizou o Dec. Lei Nº 168/99 de 18 de Maio, que define o regime aplicável à remuneração da produção de energia elétrica, no âmbito da produção em regime especial do Sistema Elétrico Independente (SEI).

A Tarifa verde, que considera uma mais-valia em função dos benefícios ambientais proporcionados, determina uma tarifa diferenciada positiva, no que respeita à remuneração do kWh produzido a partir de fontes renováveis vendido à rede elétrica pública.

**Decreto-Lei nº68/2002 de 25 de Março** Regula o exercício da atividade de produção de energia elétrica em baixa tensão (BT).

**Portaria Nº 383/2002 de 10 de Abril** No contexto do Programa E4, foi necessário proceder a alguns ajustamentos na portaria Nº 198/2001, de 13 de Março, que criou a “Medida de Apoio ao Aproveitamento do Potencial Energético e Racionalização de Consumos” (MAPE), por sua vez já alterada pela Portaria Nº 1219-A/2001, de 23 de Outubro. É definido um regime de incentivos financeiros num contexto de atribuição de subsídios reembolsáveis e a fundo perdido, considerando como elegíveis os projetos relativos a centros de produção de energia elétrica com utilização de fontes renováveis. Esta medida, inserida no eixo 2 do Programa Operacional da Economia (POE) do QCA III, esteve em vigor no período de 2000 a 2006.

**Portaria Nº 764/2002 de 1 Julho** Estabelece os tarifários aplicáveis às instalações de produção de energia elétrica em baixa tensão, licenciadas ao abrigo do Dec.Lei Nº 68/2002.

**Decreto-Lei Nº 34/2011 de 8 de Março** Para a produção de energia elétrica a partir das fontes de energia renováveis, existem em Portugal, quase que exclusivamente dois mecanismos, sendo eles o regime jurídico, que considera uma remuneração diferenciada por tecnologia das FER e respetivo regime de exploração e as medidas de apoio ao investimento inicial de projetos de produção de energia a partir das FER [25].

Em termos da meta anteriormente referida de 150 MW (conforme Resolução do Conselho de Ministros Nº 63/2003), sobre o atual enquadramento legal no que respeita ao potencial de expansão nacional dos investimentos na área da energia fotovoltaica, pode-se afirmar que a decisão de aumentar o valor em 300% em relação ao valor inicial de 50 MW, revela uma atual perspetiva de crescente interesse por parte do Governo Português. Por outro lado, em termos do enquadramento desta meta no que respeita a resultados de estudos efetuados sobre o cenário energético nacional, será de realçar os estudos efetuados pela REN, onde é referido, uma possibilidade de evolução da potência instalada até 400 MW já no ano de 2010, no que respeita à injeção de energia elétrica na rede pública de distribuição a partir de sistemas fotovoltaicos [11].

Contudo, dado o clima de instabilidade económica que decorre um pouco por todo o mundo, é expectável que estas medidas de apoio à produção de energia fotovoltaica sejam postas em stand-by. Uma forte prova disso mesmo é a redução quer da tarifa paga às novas instalações fotovoltaicas, quer da quota destinada a novas produções (10 MW em 2012, que foi esgotada na última semana de Fevereiro de 2012). Dado que nem todas as licenças pedidas são efetivamente instaladas, o governo português desde Fevereiro de 2012 que disponibiliza as licenças que foram “reservadas” mas que não deram origem a uma nova instalação de micro geração fotovoltaica.

Por norma, a remuneração aos proprietários de sistemas de micro-geração é feita mensalmente e a tarifa pela qual são abrangidos é aquela em vigor à data do pedido de licenciamento da instalação. A remuneração é “dividida” em dois regimes: o bonificado e o não bonificado. O regime bonificado

tem a duração de 15 anos e é sub-dividido em dois períodos: um primeiro período de 8 anos e um segundo período de 7 anos. O regime não bonificado prevê o pagamento ao proprietário do sistema produtor um preço nunca inferior ao praticado no mercado à data.

**Decreto-Lei Nº 363/2007 de 2 de Novembro** Este decreto-lei estabelece a tarifa de referência em € 650/MWh para os primeiros 10MW de potência instalada; por cada 10 MW adicionais de potência de ligação, a tarifa única aplicável é reduzida em 5 %, sendo que o pagamento da energia produzida a esta tarifa tem a duração de 5 anos após o qual a instalação é remunerada pela tarifa em vigor no dia 1 de Janeiro desse ano, por um período adicional de 10 anos. Findo esse período, aplica-se a taxaçaõ definida pelo regime não bonificado já mencionada anteriormente.

**Decreto-Lei Nº 118-A/2010 de 25 de Outubro** Este diploma estabelece a tarifa de referência em € 400/MWh para o primeiro período e em € 240/MWh para o segundo período sendo o valor de ambas as tarifas sucessivamente reduzido anualmente em € 20/MWh. A quota atribuída foi de 25 MW. Esgotada esta quota, as instalações seguintes têm uma remuneração de € 380/MWh para o primeiro período e de € 220/MWh para o segundo período.

**Portaria 284-2011 de 28 de Outubro** É o documento normativo presentemente em vigor, que define a tarifa de referência aplicável para o ano de 2012 em € 326/MWh para o primeiro período e de € 185/MWh para o segundo período.

Além do estabelecimento de uma tarifa de referência, por norma é definida uma quota anual de potência, que com esta Portaria foi de 10MW, tendo sido esgotada nos primeiros três meses do presente ano (2012). Desde o segundo trimestre de 2012 e mensalmente, dada a elevada procura, têm sido atribuídas licenças para a instalação e produção de sistemas de micro-geração. Neste momento, e dada a atual conjuntura económica do País, a atribuição de licenças encontra-se suspensa até novas ordens legislativas.

A Figura 3.9 demonstra a evolução das tarifas definidas nos documentos normativos indicados anteriormente.

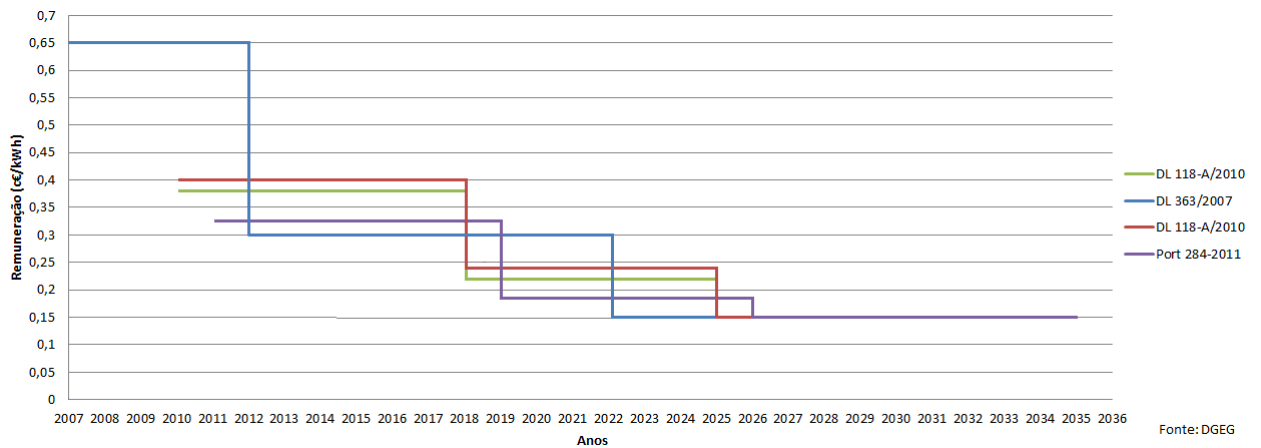


Figura 3.9: Evolução das Tarifas aplicadas à Micro-geração (2009-2012)

É claramente perceptível o incentivo inicial dado pelo Governo no início do programa de incentivo à micro-produção. Além dos benefícios fiscais, a remuneração oferecida por kWh entregue à rede era (e continua a ser) pago a um valor 60% superior ao praticado pelo DL 118-A/2010.

Mas, até que ponto as variações da remuneração de energia produzida tornam uma micro-geração menos rentável, ou de todo, inviável? Por forma a analisar tal impacto, foi elaborado um cálculo teórico da receita que pode ser obtida ao longo da vida útil de um sistema de micro-geração fotovoltaico. O método utilizado consistiu no cálculo da área que se encontra por baixo da linha colorida (referente a cada documento normativo), e multiplicar pela energia estimada em cada período abrangido pela tarifa (no caso apresentado apenas existem dois períodos distintos de remuneração). A Figura 3.10 é referente ao Decreto-Lei 363/2007.

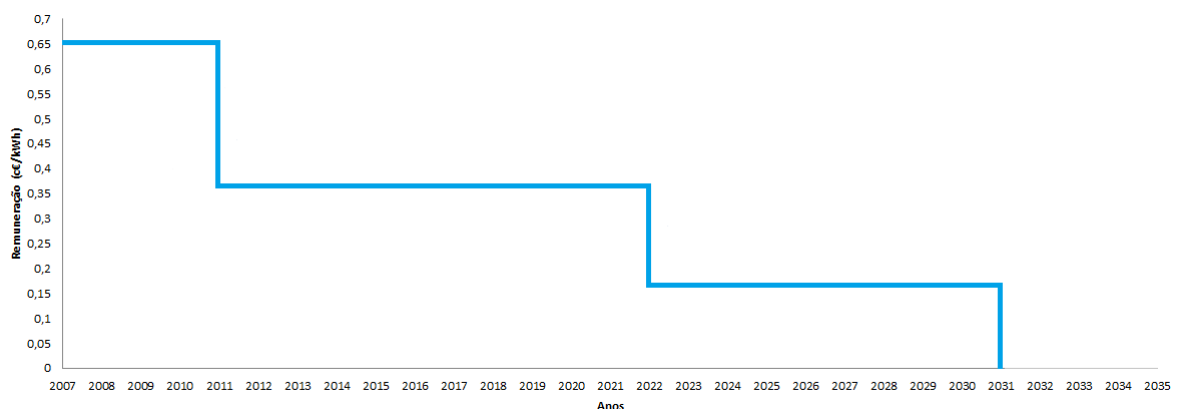


Figura 3.10: Evolução da tarifa de acordo com o DL 363/2007

Com base nos dados resultantes do trabalho efetuado no capítulo 4, foi possível determinar a receita média (teórica) por kW instalado ao longo dos últimos 6 anos. Esta análise teve em linha de conta os valores do custo da instalação e da energia produzida por cada uma. Este processo foi feito tanto para sistemas fixos quer para sistemas seguidores da energia solar. Relacionados os

diversos valores, estes foram sintetizados na tabela 3.1:

	Energia média produzida por kW instalado					
	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Sistema Fixo	1230,54	1370,77	1331,58	1338,96	1500,48	1475,95
Sistema Seguidor	1532,78	1748,30	1733,90	1853,75	1982,62	1919,07

Tabela 3.1: Produção de energia por unidade de energia instalada (kWh/kW)

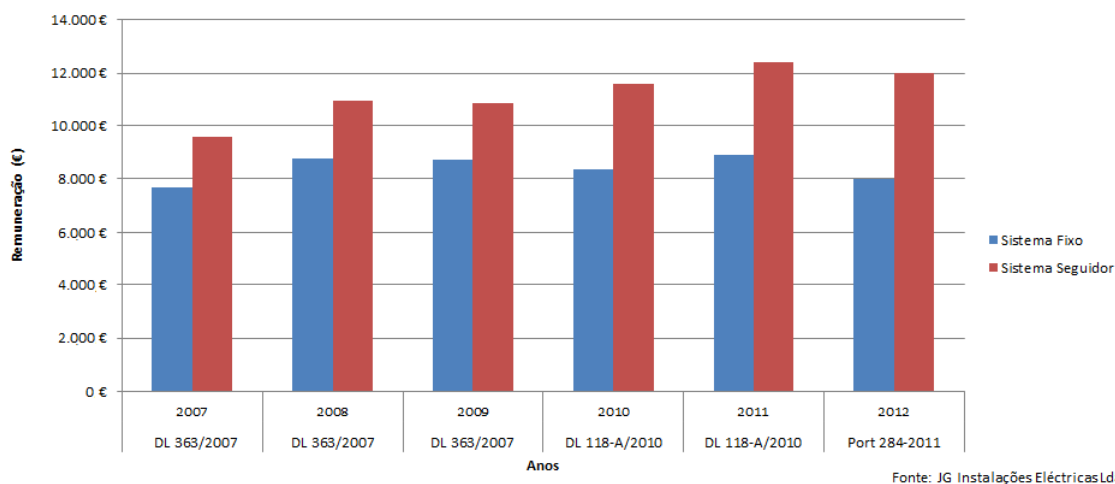


Figura 3.11: Remuneração de uma instalação de potência 1kW de acordo com os diferentes Documentos Normativos

Do gráfico anterior, podemos retirar algumas conclusões:

A diferença de remuneração acumulada entre um sistema fixo e um seguidor é assinalável (existem diferenças que atingem os 4 000,00 € por kW instalado) o que pode significar uma receita teórica adicional de 16 000,00 € no final da vida útil (25 anos) de uma instalação.

Em termos tecnológicos, o aumento de eficiência dos sistemas fotovoltaicos faz-se sentir, pois a tendência decrescente das tarifas da micro-geração não impede a "competitividade" do regime aprovado na portaria 284-2011 ao nível da rentabilidade de um sistema, sendo este contudo, inferior ao Decreto-Lei 118-A/2010.

Em termos de tecnologia de seguimento solar, ao longo dos anos também houve um aumento da eficiência destes equipamentos, referida anteriormente. Dado que atualmente a utilização deste tipo de sistemas permite uma produção de energia até 30% superior, e atendendo a que os sistemas de seguimento solar têm vindo a ser aperfeiçoados, há uma maior remuneração de sistemas seguidores no presente do que no início das instalações solares.

### 3.2.3 Emprego

Impulsionado pelo sentimento e pelos dados que demonstram que estamos próximos de um grave problema ao nível do clima, surgiu o termo "empregos verdes", referindo-se especialmente ao sector de energia renovável e que está a receber uma atenção sem precedentes. A crise climática passou, de igual modo a ser um dos temas centrais da atualidade e, como esperado, existem diversas interpretações e interesses em jogo no contexto deste debate, passando por propostas de regular as políticas ambientais, sem antes ser feita uma análise crítica sobre razões estruturais das mudanças climáticas [28]. No ano de 2008, a EPIA – European Photovoltaic Industry Association estimava que aproximadamente 130 mil pessoas estavam diretamente empregues na indústria europeia fotovoltaica e cerca de 60 mil estavam indiretamente ligados [26]. Comparando com outros sectores renováveis, a indústria de energia eólica empregava à data cerca de 300 mil pessoas, a indústria de energia solar térmica 624 mil e mais de 1 milhão de empregos estavam relacionados com a produção/comercialização de biomassa e biocombustíveis. Contudo, estes ganhos de emprego não são totais dado que há uma migração de mão de obra do sector fóssil para o sector renovável. Como postos diretos mencionam-se as áreas de instalação e manutenção de sistemas fotovoltaicos, comércio (fornecedores e distribuidores), engenheiros de produção, desenvolvimento e investigadores. Indiretamente podem-se incluir os trabalhos relacionados com arquitetura e responsáveis de integração, fornecedores de matéria prima para a produção de painéis solares (e não só), entidades reguladoras de energia, investidores, comunicação social e funcionários administrativos, representando-se de forma esquemática na Figura 3.12.

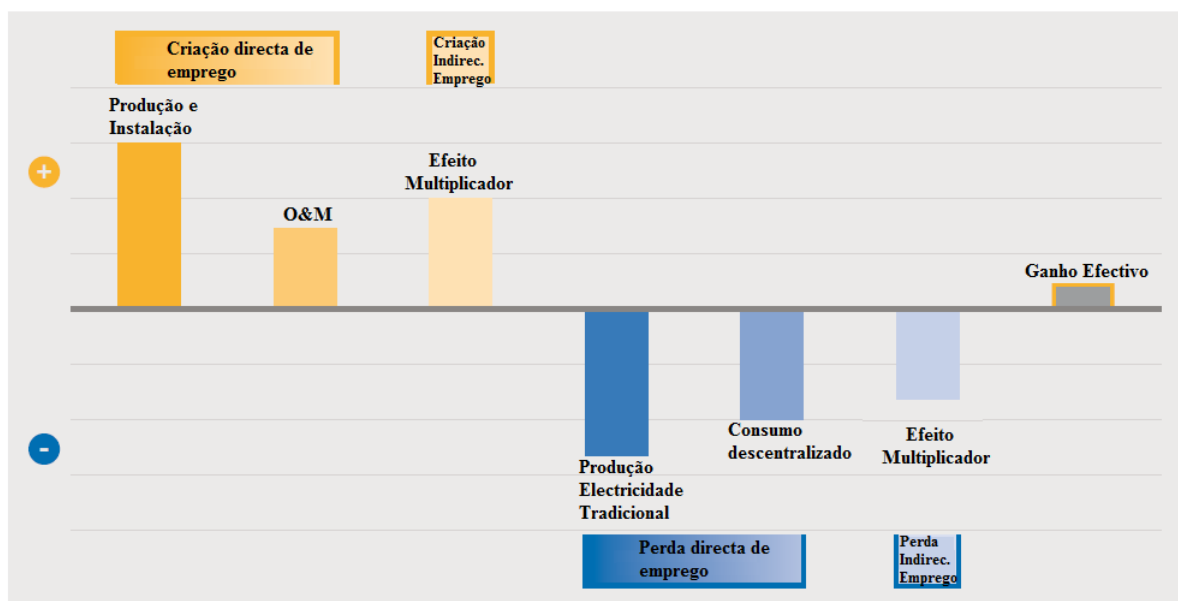


Figura 3.12: Fluxo de empregabilidade no sector fotovoltaico (adaptado de [13])

As energias renováveis tendem a ser uma fonte de energia que exige uma maior mão de obra

que os combustíveis fósseis. Com a crescente automação e consolidação das empresas, a redução de trabalhos nas áreas do petróleo, gás natural, carvão e indústrias faz-se já sentir. Centenas de milhares de empregos na mineração de carvão foram suprimidos na China, Estados Unidos, Alemanha, Reino Unido e África do Sul nas últimas duas décadas. Nos Estados Unidos por exemplo, a produção de carvão aumentou quase um terço no mesmo período de tempo mas o número de empregos foi reduzido para metade.

Graças ao forte apoio do governo, alguns países emergiram como líderes no desenvolvimento de energias renováveis. Um estudo levado a cabo pelo governo alemão concluiu que em 2006 o país tinha cerca de 259 mil empregos diretos e indiretos no sector das energias renováveis, apontando para um crescimento para valores próximos dos 400/500 mil postos de trabalho até 2020 e 710 mil em 2030.

A Espanha também viu a sua indústria de energias renováveis expandir-se rapidamente nos últimos anos. A indústria emprega hoje cerca de 89.000 pessoas diretamente (principalmente em energia eólica e fotovoltaica) e outros 100 mil de forma indireta [29].

Outro estudo [33] indica que existe o potencial na Europa para empregar em 2020 cerca de 2,5 milhões de pessoas neste sector. A eficiência energética também começará a ser uma forte aposta, indicando outro documento [30] que cerca de meio milhão de pessoas estarão empregadas nesta área até 2020.

Nos Estados Unidos, as políticas federais têm sido fracas e inconsistentes ao longo dos anos, deixando a tomada de decisões para os governos estaduais. Ainda assim, um estudo da Sociedade Americana de Energia Solar determinou que em 2006 no sector das energias renováveis, os EUA empregavam cerca de 200.000 pessoas diretamente e 246 mil pessoas indiretamente.

Vemos portanto uma tecnologia que é transversal a todos os sectores de atividade e que deve continuar a ser uma aposta cada vez mais forte.

### 3.3 AVALIAÇÃO AMBIENTAL

#### 3.3.1 Efeito de estufa

A revolução industrial<sup>8</sup> ocorrida em Inglaterra nos meados do século XVIII ditou o ponto de viragem em termos de qualidade ambiental e marcou o início de uma constante e progressiva degradação do ambiente tal como o conhecêramos. A composição da atmosfera inclui, entre outros constituintes, um conjunto de gases que faz com que parte do calor do Sol que atinge a superfície da Terra não retorne à atmosfera [4]. Este processo, designado por efeito de estufa, faz com que a temperatura na superfície terrestre seja a adequada à existência de vida.

Alguns destes gases combinam-se de forma natural, caso do dióxido de carbono ( $CO_2$ ), o metano ( $CH_4$ ) e o óxido nitroso ( $N_2O$ ). Outros são provenientes de processos industriais, tais como o hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ ), os hidrofluorcarbonos (HFCs) e os perfluorcarbonos (PFCs), entre outros. As atividades humanas libertam para a atmosfera diversos gases, a maioria dos quais nocivos. Entre os mais nefastos encontram-se os gases industriais. Embora libertados em pequenas quantidades, este tipo de gases são bastante perigosos fundamentalmente por dois motivos: primeiro não podem ser absorvidos pelos ecossistemas, devido à não existência na Natureza de seres vegetais com capacidade de absorção deste tipo de gases, tal como acontece com as árvores que têm a capacidade de absorver o dióxido de carbono ( $CO_2$ ); por outro lado, contribuem significativamente para as alterações climáticas, ao permanecerem na atmosfera por um período de tempo muito superior (na ordem dos milhares de anos), comparativamente, por exemplo, ao ( $CO_2$ ) [2].

A concentração deste tipo de gases na atmosfera está a aumentar a um ritmo sem precedentes em resultado das atividades humanas. O aumento dos níveis destes gases afeta de sobremaneira o clima e as previsões apontam para que estes efeitos sejam cada vez mais devastadores ao nível dos ecossistemas [31].

Embora não exista uma forma simples, concreta e eficaz de determinar até que ponto o clima irá mudar em consequência do aumento dos níveis de gases com efeito de estufa, a comunidade científica tem vindo a desenvolver modelos complexos para simular as múltiplas reações que ocorrem entre os diferentes componentes do sistema climático.

O conjunto da informação científica relativa às alterações climáticas tem vindo a ser sistematizado e comunicado pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), entidade que reúne centenas de cientistas de todo o mundo [3].

Os relatórios do IPCC não só confirmam a evidência científica das alterações climáticas que estão a decorrer bem como concluem que as ações humanas influenciam e muito as alterações do clima.

---

<sup>8</sup> conjunto de mudanças tecnológicas com impacto significativo no processo produtivo, provocando mudanças ao nível económico e social

### 3.3.2 Causas do efeito de estufa

A produção e utilização de energia são a principal fonte humana de emissões. O dióxido de carbono ( $CO_2$ ) proveniente da queima de combustíveis fósseis como o carvão, o petróleo ou o gás natural, é a maior fonte de gases com efeito de estufa provenientes de atividades humanas, sendo responsável por mais de 60% dessas emissões. A queima destes combustíveis fornece a maior parte da energia utilizada para produzir eletricidade, locomoção de veículos, aquecimento de habitações ou funcionamento de unidades industriais. A Figura 3.13, demonstra a concentração atmosférica deste gás desde 1870 até ao início dos anos 90 [3].

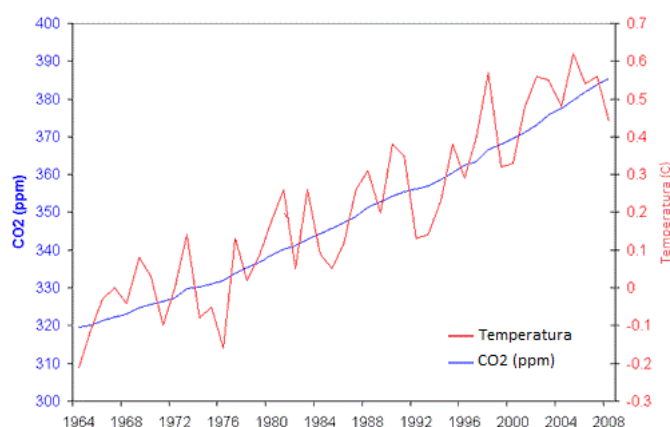


Figura 3.13: Evolução da concentração de  $CO_2$  na atmosfera e da temperatura terrestre

Podemos verificar que o aumento da concentração de  $CO_2$  é acompanhado por variações da temperatura terrestre com uma tendência crescente. Ainda que reduzida, isto quer dizer alguma coisa, e se se atender a que a concentração tem vindo a aumentar a um ritmo maior do que neste período, é de esperar um aumento de uma forma ainda mais notória da temperatura. Depois do  $CO_2$ , o metano ( $CH_4$ ) é o gás com efeito de estufa mais relevante. Este é produzido pelo gado, tanto por fermentação entérica<sup>9</sup> como por decomposição dos seus dejetos [33].

A eliminação e o tratamento de resíduos é outra fonte de metano. Quando o lixo é depositado num aterro, dá-se início a um progressivo processo de decomposição anaeróbio<sup>10</sup> e à emissão de metano. Nas situações em que este gás não é capturado e utilizado como combustível acaba por ser libertado para a atmosfera.

Outra fonte importante de metano é a produção de arroz em campos alagados (cerca de 90% da produção mundial de arroz é proveniente de campos alagados), responsável por cerca de  $\frac{1}{4}$  das emissões de metano produzidas por atividades humanas. Bactérias e outros micro-organismos existentes nos solos alagados decompõem a matéria orgânica e também contribuem para a produção de metano.

<sup>9</sup>degradação dos alimentos por bactérias e outros micro-organismos no trato digestivo

<sup>10</sup>sem oxigénio

Outro gás nocivo é o óxido nitroso ( $N_2O$ ), encontrado nos fertilizantes agrícolas. O nível de emissão depende da quantidade de fertilizante, das condições do solo e das condições climáticas, uma equação complexa que até à data não se encontra totalmente esclarecida pela comunidade científica [31].

Como mencionado, a revolução industrial levou à criação de um conjunto de potentes gases com efeito de estufa para utilizações especiais, que possuem longos períodos de vida, designados conjuntamente por F-gases, por conterem átomos de flúor na sua estrutura. Entre esses gases contam-se os hidrofluorcarbonos (HFCs) e os perfluorcarbonos (PFCs) utilizados em sistemas de refrigeração como substitutos dos CFCs, que têm um efeito nocivo na camada de ozono. O hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ ) é utilizado sobretudo como isolante em sistemas elétricos e provoca um efeito de aquecimento global 23 900 vezes superior ao do  $CO_2$  [31].

### 3.3.3 Consequências

As consequências não serão iguais em todas as zonas do globo. Os sistemas sociais e económicos tendem a ser mais vulneráveis nos países em desenvolvimento, com economias e instituições mais fracas. Por outro lado, as populações que habitem em zonas áridas ou semi-áridas, zonas costeiras ou pequenas ilhas enfrentam um risco acrescido, devido ao previsível aumento da temperatura e da conseqüentemente subida do nível do mar, dado que se prevê que o nível médio das águas do mar suba 59cm até 2100, devido à expansão térmica das camadas superficiais dos oceanos e degelo dos glaciares. Com estas alterações a qualidade das águas interiores também será afetada devido ao aumento da intrusão salina nos lençóis de água. Os modelos climáticos prevêem que, caso não sejam tomadas medidas de redução de emissões, a temperatura global subirá 1,8 a 4,0 °C entre 1990 e 2100. Estudos apontam que, mesmo que as concentrações de gases com efeito de estufa na atmosfera se mantivessem ao nível do ano 2000, seria expectável um aumento entre 0,1 e 0,9 °C, dado que o sistema climático responde à alteração dos níveis de gases com efeito de estufa com algum atraso, devido à inércia térmica dos oceanos [31].

Um natural aquecimento acontecerá na maioria das regiões, aquecimento esse mais evidente nas regiões mais frias e mais evidente durante o período de Inverno.

Prevê-se uma alteração da frequência e da intensidade de eventos climáticos extremos, dado que com o aumento da temperatura global é expectável um aumento das ondas de calor e de eventos de precipitação extrema, ao mesmo tempo que o risco de seca em zonas continentais durante o Verão aumente.

A biodiversidade também sairá afetada pelas alterações climáticas. Projecta-se que 20 a 30% de todas as espécies possam vir a ser extintas face a um aumento da temperatura média global entre 1,5 °C e 2,5 °C [32].

As florestas também serão afetadas pela mudança do clima. Está demonstrado que um aumento de 1°C na temperatura global média afetará o seu funcionamento e composição. Outras pressões causadas pelo aquecimento global incluem o aumento das pragas e do risco de incêndio. Uma vez que se espera um aquecimento maior nas latitudes superiores do que nas equatoriais, as florestas boreais serão mais afetadas do que as florestas temperadas e tropicais.

Para o ser humano, prevê-se que as alterações climáticas tenham extensas consequências para a saúde humana. É expectável um aumento do número de casos de doença e de morte por problemas cardiovasculares e respiratórios em consequência do aumento das ondas de calor [31].

Temperaturas mais elevadas podem alterar a distribuição geográfica de espécies que transmitem doenças, como mosquitos e roedores. Um problema em especial é a expansão dos mosquitos transmissores da malária.

A nível económico, na próxima década, prevê-se que os desastres naturais associados às alterações

do clima possam induzir um custo à economia mundial de cerca de 150 mil milhões de USD/ano, o equivalente a 5% do PIB mundial anual.

Simulações efetuadas identificam a possibilidade de reduzir emissões de GEE de aproximadamente 20Gt a um custo inferior a 60€/t até ao ano de 2020 e que traria benefícios não só ambientais, como também económicos. Estas poupanças seriam conseguidas principalmente através de melhorias de eficiência nos transportes e edifícios [34].

Como mencionado anteriormente, as alterações climáticas, os efeitos poluentes provenientes dos combustíveis fósseis e a tendência de aumento do preço do preço de energia desempenham um papel fundamental para a necessidade de enquadrar legalmente a produção proveniente das FER (Fontes de Energia Renováveis). A nível mundial, é fundamental mencionar o Protocolo de Quioto. A nível interno, de realçar os diversos decretos-lei e resoluções de ministros.

### 3.3.4 Protocolo de Quioto

O Protocolo de Quioto é considerado o ponto de viragem fundamental de mentalidades e atitudes, tendo contribuído para tal, em parte, o facto de ter sido amplamente divulgado pelos meios de comunicação mundiais [2]. Foi criado com o intuito de, entre outros objetivos, diminuir a emissão de gases poluentes responsáveis pelo efeito de estufa e o aquecimento global, através da aposta nos seguintes vetores: aumento das fontes de energia "limpa" (biocombustíveis, energia eólica, biomassa e solar), proteger as florestas e outras áreas verdes, aperfeiçoar os sistemas de energia e transporte, quer através do consumo racional como aumento de eficiência dos veículos e equipamentos, diminuir as emissões de gás metano (presentes, por exemplo, no lixo orgânico) e definir as regras para emissão dos créditos de carbono (certificados emitidos quando se dá a redução de gases poluentes [3]). O crescimento da percentagem do consumo da energia elétrica produzida a partir das FER, ocupa um importante espaço no pacote de medidas preconizadas no âmbito da assinatura do Protocolo de Quioto (PQ).

As linhas gerais do PQ foram traçadas em 1997 em Quioto, Japão e foi aberto para assinaturas a 16 de Março de 1998. Portugal aderiu ao PQ a 31 de Maio de 2002. Oficialmente, o Protocolo entrou em vigor em 16 de Fevereiro de 2005. O PQ é um tratado a nível global que define compromissos mais restritos para a redução da emissão dos gases com efeito de estufa (GEE), considerados como a principal causa do aquecimento global. Os países desenvolvidos são, claramente responsabilizados pelos níveis elevados de GEE, resultantes de mais de 150 anos de atividade industrial desregulada. É no PQ que se estabelece um calendário pelo qual os países desenvolvidos têm a obrigação de reduzir a quantidade de gases com efeitos poluentes em, pelo menos, 5,2% até 2012, em relação aos níveis de 1990, sendo esta percentagem variável entre os países signatários, de acordo com o princípio da responsabilidade comum, mas diferenciada [3]. A particularidade do PQ é o estabelecimento de metas obrigatórias para 37 países industrializados da Comunidade Europeia para a redução dos GEE. Em termos de política ambiental da União Europeia, a produção de energia elétrica a partir das FER aparece integrada nas estratégias prioritárias definidas no âmbito das preocupações das alterações climáticas, em particular no âmbito da desejada redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE). Os países europeus comprometeram-se em reduzir as suas emissões em 20% relativamente aos níveis de 1990, até 2020, definindo ao abrigo do compromisso comunitário de partilha de responsabilidades, metas distintas para cada um dos seus Estados-Membros e com a possibilidade de aumento do objetivo para 30% caso outras nações se comprometerem em melhorar o acordado no PQ. (Portugal comprometeu-se em limitar o aumento das suas emissões de GEE em 27% em relação às emissões de 1990). Este valor global inclui parcela de 20% em energia renovável e um incremento de 20% em eficiência energética - a tão falada "estratégia 20-20-20" [34]. O Protocolo estimula os países signatários a cooperarem entre si, de modo a cumprir estas metas, através da

implementação de algumas medidas, tais como reformulação dos sectores de energia e transportes, promover o uso de energias com origem de fontes renováveis, eliminando mecanismos financeiros e burocráticos que colocassem entraves aos objetivos do Protocolo, limitando as emissões de metano no decurso do tratamento de resíduos e dos sistemas energéticos e implementar a proteção das florestas [31].

Não obstante estas medidas, os países aderentes têm a liberdade de implementar medidas adicionais que melhorem o desempenho e o propósito do protocolo. Caso o Protocolo de Quioto seja cumprido na íntegra, os estudos efetuados estimam uma redução de temperatura global entre 1,4°C e 5,8°C até 2100. Tudo poderá ser alterado pelas negociações a realizar após o período 2008/2012, pois a comunidade científica afirma que a meta de redução de 5% em relação aos níveis de 1990 é insuficiente para a mitigação do aquecimento global [3].

A tabela 3.2 demonstra os esforços que alguns dos países aderentes ao Protocolo de Quioto se comprometeram a realizar, por forma a cumprir com o determinado, segundo a ONU.

País	$\Delta_{emiss\tilde{o}es-CFC}$ (1990-2004)	<i>Objectivo</i> UE <sub>2012</sub>	Tratado 2008-2012
Alemanha	-17%	-21%	-8%
Canadá	+27%	-	-6%
Espanha	+49%	-15%	-8%
EUA	+16%	-	Não assinado
Grécia	+27%	+25%	-8%
Irlanda	+23%	+13%	-8%
Japão	+6,5%	-	-6%
Reino Unido	-14%	-12,5%	-8%
PORTUGAL	+41%	+27%	-8%

Tabela 3.2: Mapa resumo das emissões de gases CFC no período de 1990 a 2004

Dos países representados na tabela anterior, salta à vista o facto da não assinatura por parte dos Estados Unidos da América. A justificação dada para a não adesão ao Protocolo de Quioto, reside no facto da não existência científica de que o aquecimento global e o efeito de estufa que se fazem sentir no presente, se encontram relacionados com a emissão de gases poluentes, o que demonstra a prevalência dos interesses económicos em prol do meio ambiente. Há cada vez mais argumentos que comprovam que, uma mudança no tipo de políticas ambientais será do proveito da generalidade da população mundial, oferecendo benefícios não só económicos mas também sociais e ambientais. Existem diversas publicações que referem a existência no presente da tecnologia com o potencial para serem implementadas por forma a tornar ainda mais ambicioso o valor definido pela União Europeia e com capacidade para tornar a produção de energia através de recursos renováveis bastante proveitosa e eficiente [31].

É certo que por trás desta "inércia" na mudança ao nível de emissões se encontram grandes grupos económicos/indústrias com níveis elevados de emissões de GEE. Se apenas a UE adotar estas medidas, a competitividade da indústria europeia sairá claramente prejudicada. No entanto as

atividades industriais em risco com o controlo de emissão de carbono representam uma pequena parcela do PIB europeu e empregam um número ainda inferior de pessoas, rondando um por cento no Reino Unido e dois por cento na Alemanha [20].

No entanto, as medidas que têm vindo a ser tomadas podem não chegar. Os países não OCDE são responsáveis pela totalidade do aumento previsto, 34Gt em 2020 e mais de 35Gt em 2035. Um aumento superior a 20Gt relativamente aos níveis de 2008. Esta tendência prevê que os GEE irão atingir valores de 650ppm de  $CO_2$ , o que provocará um aumento mais que provável da temperatura a longo prazo de 3,5°C, sendo que o objetivo é manter a concentração de GEE perto dos 450ppm de  $CO_2$  [12]. Outra medida apontada para se conseguir manter intacto este objetivo, passa por terminar com os subsídios aos combustíveis fósseis (frequentes em muitos países), pois provocam uma aplicação pouco eficiente dos recursos e provoca uma distorção do mercado, pois reduz de uma maneira "falsa" o preço dos combustíveis encorajando ao seu consumo em detrimento de energias renováveis ( que sem subsídios apresentam um preço bastante elevado) [35]. Só o abandono dos subsídios aos combustíveis fósseis poderia representar uma diminuição de 6%, 2Gt, nas emissões de  $CO_2$  no ano de 2020.

## 4 AVALIAÇÃO ECONÓMICA DA MICRO-GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

O presente capítulo apresenta a viabilidade de vários projetos de micro-geração, as alterações das tarifas praticadas pelo distribuidor de energia e a maneira como isso afeta a rentabilidade dos sistemas de micro-geração. Para se chegar a estas e outras conclusões, teve-se em análise 25 sistemas distribuídos pelos anos de 2009 até 2012, por forma a ter um universo onde se possa verificar a implementação das diferentes tarifas impostas pelos Decretos-Lei que têm vindo a ser publicados. De igual modo pretende-se determinar os custos de uma instalação para o utilizador, custo médio unitário de um kW, a produção de energia que o sistema poderá produzir e o retorno económico expectável. Desta forma, será possível determinar a rentabilidade do investimento através da análise do VAL (Valor Atual Líquido), da TIR (Taxa Interna de Rentabilidade) bem como determinar o período de rentabilidade do capital investido. Para cada caso, foi feito o estudo para um sistema fixo e um sistema seguidor, por forma a tentar determinar qual o sistema mais vantajoso a ser implementado.

## 4.1 Universo de estudo

Como referido anteriormente, foram utilizados os dados de 25 sistemas, tendo sido recolhido o seu custo (em €), a potência instalada (em kWp), a estimativa de energia produzida anualmente (em kWh) e, por forma a poder estabelecer conclusões e comparações entre os resultados obtidos, o custo de cada sistema com 4 kW de potência, dado que é o valor aproximado da maioria das instalações que foram projetadas. Para uma melhor leitura os dados foram divididos em duas categorias: sistemas fixos e sistemas seguidores, apresentadas nas seguintes tabelas.

#### 4.1.1 Sistemas Fixos

	Instalações de 2007					
	1 - ER02	2 - ER03	3 - ER05	4 - ER08	5 - ER11	Valor Médio
<i>Custo</i> (€)	24 162,45€	24 450,71€	24 520,57€	24 077,84€	24 734,51€	24 389,22€
<i>Pot<sub>instkWp</sub></i>	3,3	3,46	3,86	3,68	3,61	3,58
<i>Custo<sub>4kW</sub></i>	29 287,52€	28 266,71€	25 409,91€	26 171,56€	27 406,66€	27 308,53€
<i>Energia<sub>kWh/a</sub></i>	4146,00	4359,00	4644,00	4481,00	4409,00	4407,80
<i>VAL</i> (€)	- 3 076,63€	- 1 982,50€	-307,68€	-765,22€	- 1 925,73€	-1 611,55€
<i>TIR</i> (%)	4,5	5,03	5,83	5,60	5,03	5,21
<i>PR</i> (anos)	>25	>25	>25	>25	>25	>25

	Instalações de 2008					
	1 - ER01	2 - ER04	3 - ER05	4 - ER06	5 - ER10	Valor Médio
<i>Custo</i> (€)	21 195,14€	21 830,99€	22 704,23€	22 931,27€	22 485,92	22 229,51€
<i>Pot<sub>instkWp</sub></i>	3,3	3,63	3,46	3,3	3,86	3,51
<i>Custo<sub>4kW</sub></i>	25 691,07€	24 056,19€	26 247,66€	27 795,48€	23 301,47€	25 418,38€
<i>Energia<sub>kWh/a</sub></i>	4621,00	4859,00	4783,00	4638,00	5156,00	4811,40
<i>VAL</i> (€)	2 091,96€	2 501,64€	1 178,22€	86,76€	3 201,79€	1 812,07€
<i>TIR</i> (%)	7,09	7,39	6,60	6,04	7,83	6,99
<i>PR</i> (anos)	10,25	9,96	10,76	11,39	9,54	10,38

	Instalações de 2009					
	1 - ER07	2 - ER25	3 - ER28	4 - ER33	5 - ER35	Valor Médio
<i>Custo</i> (€)	17 087,38€	16 273,95€	16 072,81€	17 116,97€	16 824,50€	16 675,12€
<i>Pot<sub>instkWp</sub></i>	3,675	3,96	3,78	3,96	3,8	3,84
<i>Custo<sub>4kW</sub></i>	18 598,51€	16 438,33€	17 008,27€	17 289,97€	17 710,00€	17 408,99€
<i>Energia<sub>kWh/a</sub></i>	5021,00	5033,00	5216,00	5032,00	5231,00	5106,00
<i>VAL</i> (€)	7 034,63€	7 403,06€	8 878,15€	6 546,84€	8 115,44€	7 595,62€
<i>TIR</i> (%)	10,85	11,76	12,67	10,85	11,86	11,60
<i>PR</i> (anos)	7,54	7,01	6,53	7,54	6,96	7,12

	Instalações de 2011					
	1 - ER01	2 - ER25	3 - ER41	4 - ER69	5 - ER75	Valor Médio
<i>Custo</i> (€)	16 253,47€	14 906,90€	13 929,85€	12 144,86€	14 172,80€	14 281,58€
<i>Pot<sub>instkWp</sub></i>	4,00	3,80	3,80	4,23	4,23	4,18
<i>Custo<sub>4kW</sub></i>	16 253,47€	15 691,47€	14 663,00€	11 484,50€	13 402,17€	14 298,92€
<i>Energia<sub>kWh/a</sub></i>	5745,00	6400,00	6624,00	6429,00	6147,00	6269,00
<i>VAL</i> (€)	6 158,52€	8 085,91€	9 769,77€	12 230,47€	9 271,19€	9 103,17€
<i>TIR</i> (%)	10,27	11,75	13,37	17,56	13,64	13,32
<i>PR</i> (anos)	7,52	6,83	6,21	5,00	6,12	6,34

	Instalações de 2012					
	1 - ER01	2 - ER04	3 - ER08	4 - ER15	5 - ER17	Valor Médio
<i>Custo</i> (€)	13 602,25€	12 418,38€	12 028,65€	11 058,74€	12 212,20€	12 264,04€
<i>Pot<sub>instkWp</sub></i>	4,40	4,23	4,23	4,40	4,40	4,33
<i>Custo<sub>4kW</sub></i>	12 365,68€	11 743,14€	11 374,61€	10 053,40€	11 102,00€	11 327,77€
<i>Energia<sub>kWh/a</sub></i>	6225,00	6410,00	6429,00	6431,00	6474,00	6393,00
<i>VAL</i> (€)	7 896,03€	9 120,98€	8 742,53€	10 070,62€	9 156,27€	8 997,28€
<i>TIR</i> (%)	12,60	13,96	13,37	17,56	13,64	14,21
<i>PR</i> (anos)	6,50	5,99	6,02	5,31	5,83	5,93

#### 4.1.2 Sistemas Seguidores

	Instalações de 2007					
	1 - ER02	2 - ER03	3 - ER05	4 - ER08	5 - ER11	Valor Médio
<i>Custo (€)</i>	27 242,25€	27 530,71€	27 600,57€	27 157,84€	27 814,51€	27 469,22€
<i>Pot<sub>instkWp</sub></i>	3,3	3,46	3,86	3,68	3,61	3,58
<i>Custo<sub>4kW</sub></i>	33 021,16€	31 827,41€	28 601,62€	29 519,39€	30 819,40€	30 757,80€
<i>Energia<sub>kWh/a</sub></i>	5016,66	5361,57	5851,44	5578,85	5643,52	5490,41
<i>VAL (€)</i>	-1 306,92€	502,33€	3 023,94€	2 111,39€	1 797,23€	1 225,59€
<i>TIR (%)</i>	5,46	6,22	7,43	6,97	6,79	6,57
<i>PR (anos)</i>	>25	24,11	9,66	10,13	10,32	10,60

	Instalações de 2008					
	1 - ER01	2 - ER04	3 - ER05	4 - ER06	5 - ER10	Valor Médio
<i>Custo (€)</i>	24 564,65€	24 910,99€	25 918,21€	25 975,85€	25 428,09€	25 359,56€
<i>Pot<sub>instkWp</sub></i>	3,3	3,63	3,46	3,3	3,3	3,51
<i>Custo<sub>4kW</sub></i>	29 775,33€	27 450,13€	29 963,25€	31 485,88€	30 821,93€	29 899,30€
<i>Energia<sub>kWh/a</sub></i>	5683,83	6073,75	6122,24	5996,93	6805,92	6136,53
<i>VAL (€)</i>	4 396,66€	5 748,64€	5 144,77€	4 571,05€	4 158,61€	4 803,95€
<i>TIR (%)</i>	7,96	8,78	8,28	7,93	7,80	8,15
<i>PR (anos)</i>	9,42	8,72	9,14	9,45	9,57	9,6

	Instalações de 2009					
	1 - ER07	2 - ER25	3 - ER28	4 - ER33	5 - ER35	Valor Médio
<i>Custo (€)</i>	19 668,11€	17 556,77€	19 111,40€	20 098,17€	19 206,11€	19 128,11€
<i>Pot<sub>instkWp</sub></i>	3,675	3,96	3,78	3,96	3,8	3,84
<i>Custo<sub>4kW</sub></i>	21 407,47€	17 734,11€	20 223,70€	20 301,18€	20 216,96€	19 976,68€
<i>Energia<sub>kWh/a</sub></i>	6326,46	6442,24	6832,96	6793,20	6852,61	6649,49
<i>VAL (€)</i>	10 886,06€	12 786,44€	13 688,02€	11 883,53€	13 615,03€	12 571,81€
<i>TIR (%)</i>	12,50	15,20	14,64	13,47	14,60	12,00
<i>PR (anos)</i>	6,62	5,42	5,65	6,15	5,66	5,90

	Instalações de 2010					
	1 - ER02	2 - ER30	3 - ER40	4 - ER42	5 - ER55	Valor Médio
<i>Custo</i> (€)	18 141,76€	19 211,81€	19 253,92€	19 072,59€	18 306,59€	19 128,11€
<i>Pot<sub>instkWp</sub></i>	3,74	3,45	3,96	4,0	3,78	3,9
<i>Custo<sub>4kW</sub></i>	19 402,95€	22 274,56€	19 448,40€	19 072,59€	19 371,59	19 976,68€
<i>Energia<sub>kWh/a</sub></i>	6924,00	6947,00	6830,00	7170,00	8240,00	7222,20
<i>VAL</i> (€)	10 898,02€	6 152,30€	8 782,04€	10 266,77€	16 305,98€	10 481,02€
<i>TIR</i> (%)	12,32	9,18	11,12	12,06	15,31	12,00
<i>PR</i> (anos)	6,61	8,17	7,11	6,71	5,59	6,84

	Instalações de 2011					
	1 - ER01	2 - ER25	3 - ER41	4 - ER69	5 - ER75	Valor Médio
<i>Custo</i> (€)	18 863,77€	17 242,16€	16 533,90€	14 721,22€	16 325,26€	16 737,26€
<i>Pot<sub>instkWp</sub></i>	4,0	3,8	3,8	4,23	4,23	4,18
<i>Custo<sub>4kW</sub></i>	18 863,77€	18 149,64€	17 404,11€	13 920,78€	15 437,59€	16 755,18€
<i>Energia<sub>kWh/a</sub></i>	7945,00	8215,00	8280,00	8679,00	8298,00	8293,40
<i>VAL</i> (€)	12 130,70€	12 368,90€	13 137,83€	18 095,79€	15 170,67€	14 180,78€
<i>TIR</i> (%)	13,12	13,53	14,30	20,00	16,7	15,53
<i>PR</i> (anos)	6,30	6,15	5,89	4,49	5,21	5,61

	Instalações de 2012					
	1 - ER01	2 - ER04	3 - ER08	4 - ER15	5 - ER17	Valor Médio
<i>Custo</i> (€)	16 519,32€	14 633,82€	14 632,70€	13 701,38€	14 854,84€	14 868,41€
<i>Pot<sub>instkWp</sub></i>	4,0	4,23	4,23	4,4	4,4	4,33
<i>Custo<sub>4kW</sub></i>	16 519,32€	13 838,13€	13 837,06€	12 455,80€	13 504,40€	14 868,41€
<i>Energia<sub>kWh/a</sub></i>	8092,00	8225,00	8416,00	8450,00	8384,00	8313,40
<i>VAL</i> (€)	9 821,60€	12 935,84€	12 500,06€	13 987,70€	12 732,55€	12 395,55€
<i>TIR</i> (%)	12,16	15,52	15,21	17,36	15,60	15,17
<i>PR</i> (anos)	6,68	5,49	5,59	5,00	5,47	5,65

## 4.2 Custos

Um sistema de micro-geração é composto por diversos componentes, alguns com um custo reduzido tais como o quadro elétrico, o contador de energia e o maciço de suporte da estrutura, apenas para citar alguns, e o restante equipamento tais como painéis e a estrutura de suporte destes. No conjunto, representam um investimento considerável. Da análise dos dados resulta a Figura 4.1, representativa da evolução histórica do custo de cada um dos sistemas fotovoltaicos, com instalação fixa e com o sistema seguidor.

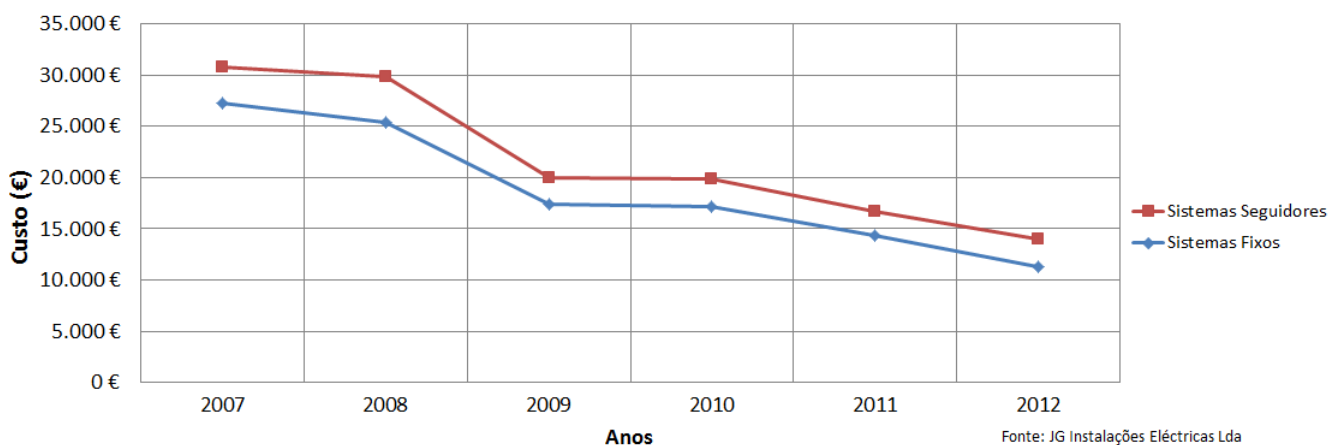


Figura 4.1: Custo médio de uma micro-geração de 4 kW

Com preços a variar entre os 12.700,00€ e os 20.942,00€ (no caso dos sistemas fixos) e os 15.438,00€ e os 23.554,00€ (no caso dos sistemas seguidores), verifica-se a existência de uma diferença de custo entre uma instalação fixa e uma instalação seguidora, como seria de esperar, mas uma diferença que se mantém praticamente inalterada ao longo dos anos. Verifica-se também que o custo total de uma instalação de micro-geração tem vindo a decrescer ao longo do tempo. A massificação da produção de painéis solares e dos restantes materiais, a concorrência através do aparecimento no mercado de novas marcas e empresas dedicadas a este tipo de tecnologia, os benefícios fiscais criados para o efeito afiguram-se como alguns dos principais motivos que justificam os dados obtidos anteriormente. Numa análise final ao gráfico apresentado anteriormente, o custo de uma instalação seguidora de energia solar é, como seria de esperar, superior. Este valor é, em média, 18% mais elevado comparativamente ao custo de uma instalação fixa, encontrando-se esta diferença de preço relacionado com a estrutura.

A dúvida que se coloca está relacionada com a diferença de custo entre uma instalação fixa e uma instalação seguidora, que pode tornar esta última menos rentável ao nível das produções no decorrer da vida útil de uma instalação fotovoltaica, sendo este o principal objetivo deste capítulo.

### 4.3 Custo médio unitário do kW

Na altura da tomada de decisão da realização de um investimento, um dos fatores que mais pesam, senão o mais importante, reside no quanto se poderá beneficiar com a realização do mesmo e os riscos a ele associados. Propõe-se abordar o "problema" do seguinte ângulo:

É do conhecimento geral que o fornecedor de energia elétrica remunera o produtor de energia renovável numa tarifa (definido no capítulo 3.2.6), variável consoante o tipo de contrato (e a data deste) porém, qual o custo, para o produtor, de uma unidade de energia produzida?

Este valor pode ser determinado efetuando os seguintes cálculos, sendo apenas necessário saber a potência do sistema em questão e o seu custo. Neste caso concreto, a potência do sistema era de 3,99 kWp e o seu custo foi de 20 492,00€. Em termos de custo, pode-se considerar que, aproximadamente 60% do valor total é devido aos painéis fotovoltaicos, 20% para a estrutura de fixação e o restante valor para a legalização das instalações e restante material ( inversor, cablagem, sistemas de protecção, entre outros). As equações 4.1, 4.2 permitem calcular o custo por kW instalado e o custo por unidade de energia produzida, respetivamente.

$$Custo_{kWp} = \frac{Custo_{sistema}}{Potência_{sistema}} = \frac{20.492,00}{3,99 \times 10^3} = 5.248,62\text{€/kWp} \quad (4.1)$$

$$Custo_{kW} = \frac{Custo_{kWp}}{K_a \times H_a} = \frac{5.248,62}{12,78 \times 1500} = 0,27\text{€/kWh} \quad (4.2)$$

$$com K_a = \frac{1}{tx_{act}} - \frac{1}{(tx_{act} \times (1 + tx_{act})^n)} = 12,78 \quad (4.3)$$

Na equação (4.2), o valor 12,78 representa a vida útil, em anos, após a correção utilizando a expressão de custos nivelizados, de uma instalação solar e o valor 1500 (Ha) representa o número de horas da utilização efetiva da potência instalada na região onde se elaborou este estudo (Bragança).

De referir que um sistema com uma potência instalada igual ao exemplo anterior poderá ter um preço unitário por kW inferior, caso se encontre numa zona com uma maior exposição solar.

A Figura 4.2 relaciona a diferença do custo por kWh produzido, entre um sistema fixo e um sistema seguidor solar, nos casos anteriormente estudados.

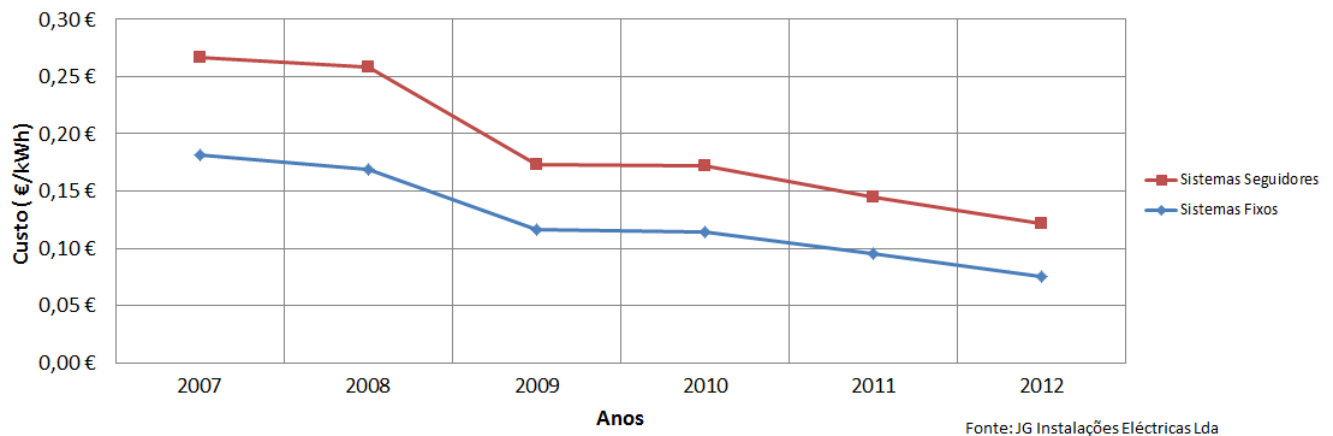


Figura 4.2: Custo unitário em diferentes instalações fotovoltaicas

Numa primeira análise à Figura anterior, verificamos que o preço de custo por kWh tem vindo a decrescer ano após ano. Relacionando a Figura 4.2 anterior com a Figura 3.9, verificamos que o preço de custo tem acompanhado a tendência das tarifas dos Decretos-Lei que foram entrando em vigor, e que reduzem sucessivamente a tarifa de venda de energia produzida através de sistemas fotovoltaicos.

Feita uma análise da margem, verifica-se que na situação atual (e de igual modo a mais desfavorável), ao abrigo da Portaria 284-2011 o produtor conseguirá obter uma margem teórica máxima de aproximadamente 300% no primeiro período do regime bonificado por kWh produzido, decrescendo esse valor para próximo dos 125% no segundo período bonificado. Estes valores de margem foram obtidos e representam a diferença entre a remuneração paga pela empresa distribuidora e o preço de custo de kWh para o utilizador. Isto porque no primeiro período do regime bonificado o produtor de energia recebe 0,32 €/kW produzido, havendo casos em que o custo unitário ronda os 0,10 €/kW. Existe uma imprecisão associada a todos os estudos de rentabilidade efetuados devido ao desconhecimento do valor pago pelo distribuidor quando o período bonificado terminar. Em todo o caso, os estudos são efetuados partindo da premissa constante nos Decretos-Leis de que o preço pago pelo distribuidor de energia nunca será inferior ao do preço de custo para o utilizador. Tem-se também em conta para o cálculo deste valor uma taxa de inflação anual do preço da energia de apenas 3%, quando se prevê que os aumentos na tarifa energética sejam superiores. Desta forma, os estudos efetuados que serviram de base para esta análise representam uma previsão por defeito dos reais valores que se poderão obter.

## 4.4 Produção de energia

Mostrou-se anteriormente que o custo de um sistema fotovoltaico varia consoante o tipo de sistema adotado: fixo ou seguidor. É importante determinar até que ponto a escolha de um determinado tipo de sistema é economicamente mais rentável relativamente à outra opção? Para cada caso realizou-se um estudo de rentabilidade, em que o retorno do investimento é calculado utilizando o método da taxa interna de retorno (TIR) . De seguida apresenta-se uma estimativa da energia produzida por sistema (fixo ou seguidor), tendo por base os dados das instalações anteriores bem como das seguintes considerações:

$$n_{horas-uso_{potência instalada}} = 1500horas \quad tempo_{vida-instalação} = 25anos \quad taxa_{inflação-anual} = 3\%$$

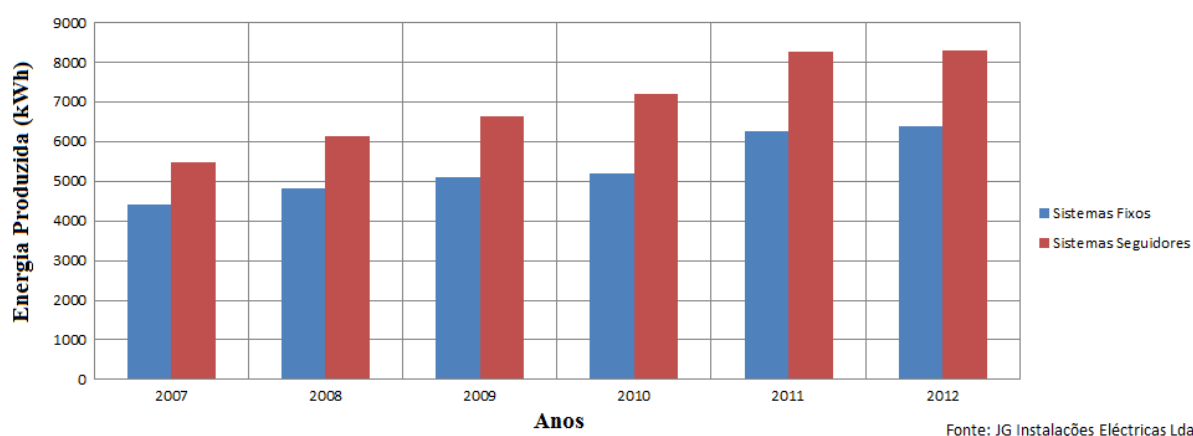


Figura 4.3: Produção de energia anual de uma instalação fotovoltaica de 4kW

Analisando a Figura 4.3, os primeiros sistemas fixos permitiam obter produções variáveis entre os 4500 kWh e os 6500 kWh. O rendimento dos painéis tem vindo a aumentar (entre a menos produtiva e a mais produtiva aqui consideradas, atinge-se uma diferença de produção de quase 50%). Esta diferença é explicada pela evolução da tecnologia fotovoltaica, os diversos locais da instalação e o aperfeiçoamento dos dados que têm vindo a ser recolhidos que permitem a realização de estudos de rentabilidade mais precisos e fiáveis. Relativamente aos sistemas seguidores, as produções oscilam historicamente entre os 5500 kWh anuais e os 8100 kWh. O aperfeiçoamento da tecnologia fotovoltaica e do próprio sistema de seguimento da luz solar permitiu um acréscimo de aproximadamente 50% das produções recorrendo a este tipo de sistema. Numa última análise, para a mesma instalação, a decisão de optar por um sistema seguidor solar poderá trazer produções superiores anuais médias de 23,3%.

## 4.5 Indicadores Económicos

Para ser possível determinar de antemão se o investimento que se irá efetuar é rentável, é necessário fazer a sua avaliação económica tendo em conta os seguintes indicadores económicos.

Os indicadores económicos frequentemente utilizados nestes casos são VAL (Valor Atual Líquido), a TIR (Taxa Interna de Rentabilidade) e o PR ou Payback, descritos de seguida [36].

### 4.5.1 VAL

O VAL (Valor Atual Líquido) define-se como sendo a diferença entre os valores atualizados das entradas e saídas de dinheiro durante o período de vida útil de um projeto.

Tem como objetivo avaliar a viabilidade de um projeto de investimento através do cálculo do valor atual de todos os seus cash-flows.

Por valor atual entende-se o valor no presente de um determinado montante a obter no futuro. Como qualquer investimento, apenas se obtém retorno no futuro, sendo por isso necessário atualizar o valor de cada um desses cash-flows e compará-los com o valor do investimento. No caso do valor do investimento ser inferior ao valor atual dos cash-flows, o VAL é positivo o que significa que o projeto apresenta uma rentabilidade positiva.

Para atualizar os cash-flows futuros é aplicada uma taxa de atualização de 6%.

$$VAL = \sum_{j=1}^n \frac{R_{Lj}}{(1+i)^j} - I_t$$

com

$R_{Lj}$  – Receita líquida do ano  $j$

$n$  – Vida útil do projeto

$I_t$  – Investimento total

$i$  – Taxa de atualização

### 4.5.2 TIR

A TIR (Taxa Interna de Rentabilidade) é a taxa de atualização que anula o VAL. Por outras palavras, é a taxa que o investidor obtém em média a cada ano sobre os capitais que se mantêm investidos num determinado projeto, enquanto o investimento inicial é recuperado progressivamente.

É calculada da seguinte forma:

$$0 = \sum_{j=1}^n \frac{R_{Lj}}{(1+TIR)^j} - I_t$$

### 4.5.3 PR

O período de recuperação do capital investido é, tal como o nome indica, o período de tempo necessário até à recuperação do capital investido. Acontece quando

$$\sum_{j=1}^P \frac{RL_j}{(1+i)^j} \geq I_t$$

com

$P$  - Período de recuperação do capital investido

#### 4.5.4 Indicadores económicos aplicados ao estudo de caso

Para o cálculo dos indicadores atrás mencionados foram utilizados os valores de energia simulados para os diferentes casos, recorrendo para esse efeito ao Microsoft Excel. De seguida apresenta-se um exemplo para uma situação estudada e aplicada, mais concretamente o 3º sistema fixo apresentado no ano de 2007 - ER05.

Na tabela 4.1 apresenta-se a produção estimada ao longo da vida útil da instalação (25 anos), considerando que decorrido este período de tempo o sistema tem uma perda total de aproximadamente 7% no rendimento global do sistema fotovoltaico, comparativamente ao momento da instalação. Este valor é recomendado pelos diversos fabricantes de equipamentos fotovoltaicos.

$E_{p1}$	$E_{p2}$	$E_{p3}$	$E_{p4}$	$E_{p5}$	$E_{p6}$	$E_{p7}$	$E_{p8}$	$E_{p9}$	$E_{p10}$	$E_{p11}$	$E_{p12}$	$E_{p13}$	$E_{p14}$	$E_{p15}$
4812	4798	4783	4769	4754	4740	4726	4712	4698	4684	4670	4656	4642	4628	4614
$E_{p16}$	$E_{p17}$	$E_{p18}$	$E_{p19}$	$E_{p20}$	$E_{p21}$	$E_{p22}$	$E_{p23}$	$E_{p24}$	$E_{p25}$					
4600	4586	4572	4559	4545	4531	4518	4504	4491	4477					

Tabela 4.1: Estimativa de produção de energia num sistema fotovoltaico fixo

Após a obtenção dos valores anteriores, o passo seguinte foi calcular a taxa a que o kWh foi pago ao abrigo do Decreto-Lei em vigor. Neste caso específico, o kWh é pago ao abrigo do DL 363/2007 e de acordo com a tabela a seguir apresentada.

Ano	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Remuner. ( c€/kWh)	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326
Ano	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	
Remuner. ( c€/kWh)	0,326	0,326	0,326	0,326	0,228	0,235	0,242	0,25	0,257	0,265	
Ano	2028	2029	2030	2031							
Remuner. ( c€/kWh)	0,273	0,281	0,289	0,298							

Table 4.2: Remuneração de acordo com DL363/2007

De seguida, multiplica-se o valor da energia produzida (indicado na tabela 4.1) com o valor pago pelo fornecedor de energia (4.2)

$Rem_1$	$Rem_2$	$Rem_3$	$Rem_4$	$Rem_5$	$Rem_6$	$Rem_7$	$Rem_8$	$Rem_9$	$Rem_{10}$	$Rem_{11}$	$Rem_{12}$
3128	3118	3109	3099	3090	1545	1540	1536	1531	1526	1522	1517
$Rem_{13}$	$Rem_{14}$	$Rem_{15}$	$Rem_{16}$	$Rem_{17}$	$Rem_{18}$	$Rem_{19}$	$Rem_{20}$	$Rem_{21}$	$Rem_{22}$		
1513	1508	1504	1051	1079	1108	1138	1168	1200	1232		
$Rem_{23}$	$Rem_{24}$	$Rem_{25}$									
1265	1299	1334									

Tabela 4.3: Rendimento estimado (€) num sistema fotovoltaico fixo

De seguida, recorrendo ao Microsoft Excel e utilizando a fórmula VAL(), obtemos o Valor Atual Líquido do projeto em questão apenas necessitando de indicar a taxa de atualização do projeto, obtendo-se obteve-se um valor atual líquido de -307,68€. De recordar que a taxa de atualização

utilizada foi de 6%. Outro processo seria calcular de forma analítica utilizando a expressão indicada no ponto 4.5.1.

Para a obtenção dos valores da Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) e do Período de Retorno, foram utilizadas, respetivamente as funções automáticas do Excel, TIR() e PREVISAO() em detrimento das expressões analíticas, por forma de agilizar a obtenção de resultados. À exceção de alguns projetos analisados do ano de 2007, todos os restantes apresentam resultados do VAL positivos. De seguida, na tabela 4.4 são apresentados os valores médios dos indicadores atrás mencionados, relativamente às instalações de sistemas fixos e de sistemas seguidores, compreendidas entre os anos de 2007 e 2012.

Ano	$VAL_{SistemasFixos}$	Ano	$VAL_{SistemasSeguidores}$
2007	-1 611,55€	2007	1 225,59€
2008	1 812,07€	2008	4 803,95€
2009	7 595,62€	2009	12 571,81€
2010	4 712,38€	2010	10481,02€
2011	9 103,17€	2011	14 180,02€
2012	8 997,28€	2012	12 395,55€

Tabela 4.4: VAL médio das instalações fotovoltaicas

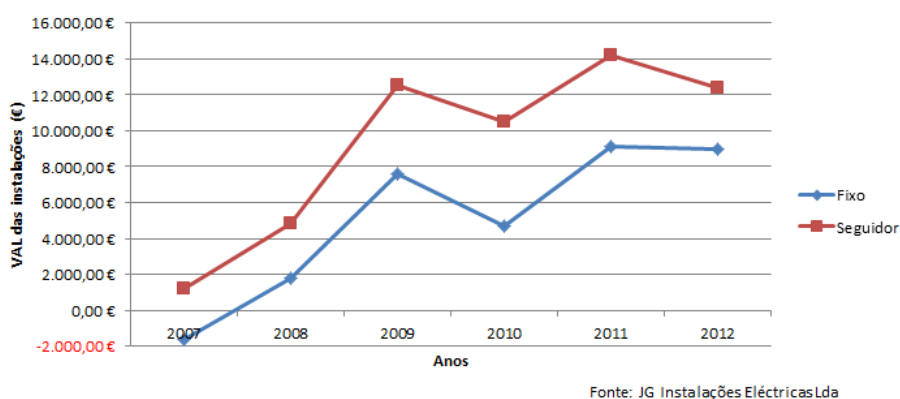


Figura 4.4: Tendência do VAL das instalações fotovoltaicas

Pela análise da Figura 4.4, o VAL tem vindo a aumentar ano após ano, tornando o investimento cada vez mais compensatório e atrativo. A massificação da tecnologia e a produção em larga escala, contribuiu de forma decisiva para a redução dos preços. No ano de 2007 denota-se um valor médio bastante dispar quando comparado com os valores dos demais anos dado que neste ano foram analisados casos cujos indicadores económicos apresentaram resultados contrários à tendência dos sistemas fotovoltaicos. A tecnologia poderá ser apontada como uma das causas para esta situação anómala. Nos demais casos, a constante evolução da tecnologia, que tem aumentado a eficiência dos painéis fotovoltaicos (levando a um aumento de energia produzida e da consequente remuneração

para os proprietários) são dos fatores principais que explicam os valores obtidos anteriormente. É importante referir o facto de as curvas (dos sistemas fixos e dos seguidores) não terem sempre a mesma inclinação. Também as estruturas de seguimento solar têm vindo a ser aperfeiçoadas, de maneira que se verifica um aumento ainda maior do VAL nestes sistemas. A Figura 4.5 é ilustradora desta situação, onde se apresenta a relação entre a produção obtida ao longo dos últimos anos entre sistemas seguidores e sistemas fixos.

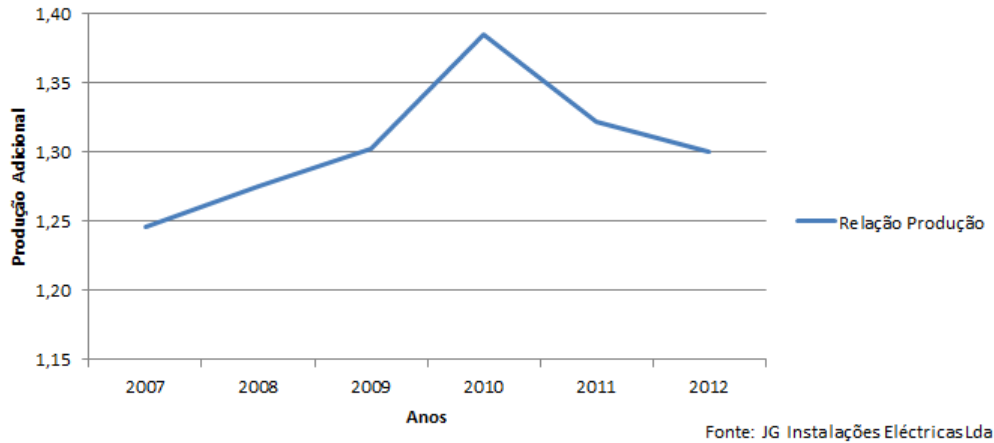


Figura 4.5: Relação da produção de energia entre sistemas seguidores

Através da análise da Figura 4.5, constata-se que um sistema seguidor consegue atingir uma produção superior, relativamente a sistemas fixos, na ordem dos 30%. Historicamente, constata-se um decréscimo entre a relação da produção adicional entre sistemas fixos e sistemas seguidores, nomeadamente a partir do ano de 2010. Este pico observado no ano de 2010 tem em linha de conta as instalações escolhidas para o estudo de caso. Diferentes instalações e equipamentos resultam em diferentes resultados que se traduziu nesta alteração da relação entre a produção de sistemas fixos e sistemas seguidores.

Ano	$TIR_{SistemasFixos}$	Ano	$TIR_{SistemasSeguidores}$
2007	5,21%	2007	6,57%
2008	6,99%	2008	8,15%
2009	11,60%	2009	14,08%
2010	9,19%	2010	12%
2011	13,32%	2011	15,53%
2012	14,21%	2012	15,17%

Tabela 4.5: TIR médio das instalações fotovoltaicas



Figura 4.6: Tendência da TIR das instalações fotovoltaicas

Uma análise aos dados obtidos relativamente à TIR dos sistemas fotovoltaicos de micro geração, reflete o que tem vindo a ser constatado ao longo dos pontos anteriores. Com o sistemático decréscimo dos preços dos sistemas e aumento de eficiência dos painéis, os sistemas têm vindo a ficar cada vez mais rentáveis, mesmo tendo em conta que a remuneração paga pelo distribuidor de energia tem vindo a ser reduzida para valores que a primeira vista demovem a realização de investimentos.

Ano	$PR_{SistemasFixos}$	Ano	$PR_{SistemasSeguidores}$
2007	12,26 anos	2007	10,60 anos
2008	10,38 anos	2008	9,26 anos
2009	7,12 anos	2009	5,90 anos
2010	8,26 anos	2010	6,84 anos
2011	6,34 anos	2011	5,61 anos
2012	5,93 anos	2012	5,65 anos

Tabela 4.6: PR médio das instalações fotovoltaicas

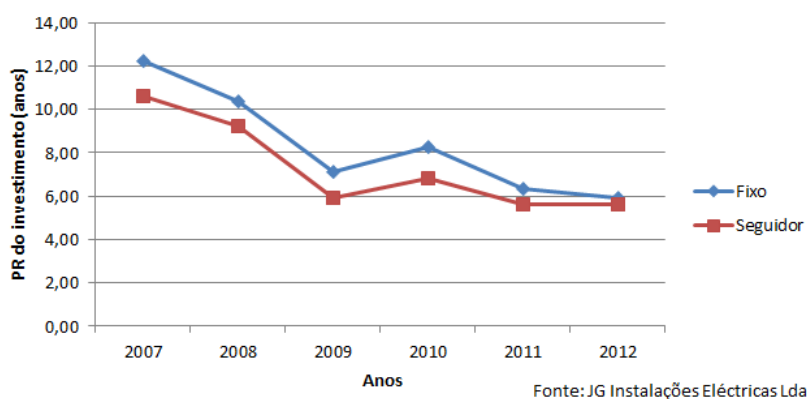


Figura 4.7: Tendência do PR das instalações fotovoltaicas

O período de retorno do investimento, encontra-se diretamente ligado com os indicadores económicos calculados anteriormente numa razão inversamente proporcional. Como verificado na Figura 4.7, os fixos apresentam um período de retorno sempre maior, pese embora o seu custo seja in-

ferior. Historicamente, verifica-se a tendência pelo encontro dos períodos de retorno quer dos sistemas fixos quer dos sistemas seguidores em torno dos 6 anos.

## 4.6 Análise e comparação de casos reais

Neste ponto pretende-se analisar o erro existente entre os estudos de rentabilidade efetuados em fase de projeto e a rentabilidade que a instalação obteve no decorrer do primeiro ano.

A instalação em causa trata-se de um sistema de seguimento solar, projetada e instalada no ano de 2009 e que em termos de remuneração se encontra abrangida pelo Decreto-Lei 363/2007.

Analisando o estudo de rentabilidade efetuado no momento do pedido de orçamento, calculou-se para o local em questão uma produção anual de 7034 kWh, através da utilização do simulador referenciado em [13].

Este simulador, disponível online, permite a qualquer utilizador e de uma forma simples e eficaz, prever a produção que determinado sistema poderá produzir. Para o cálculo de energia produzida, o simulador do Sistema de Informação Geográfico Fotovoltaico (PVGIS) fornece uma base de dados dos recursos energéticos e produções de energia elétrica provenientes de diversos sistemas instalados na Europa, África e Sudoeste Asiático [13]. Esta entidade contribui para a implementação da energia renovável na União Europeia de uma forma sustentável e por forma a tornar-se uma fonte de energia a longo prazo através do apoio ao desenvolvimento de novas tecnologias.

No que toca ao simulador, a Figura 4.8 apresenta o interface gráfico com que o utilizador se depara na realização de uma simulação.

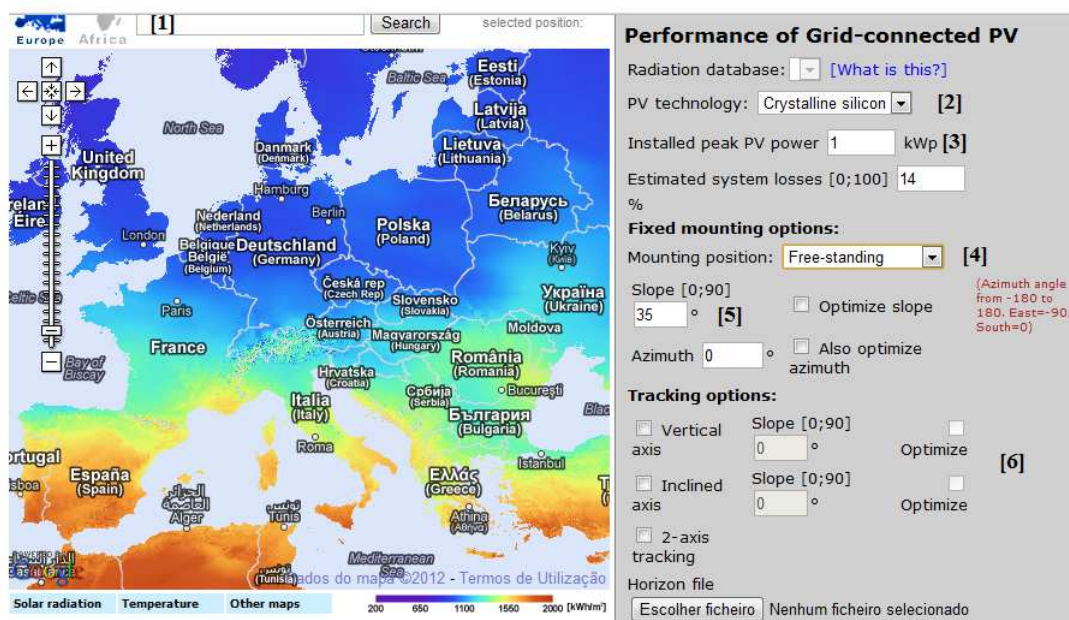


Figura 4.8: Interface do simulador PVGIS

A numeração inserida na Figura 4.8 permite ao utilizador definir os parâmetros enunciados na tabela 4.7, apresentados de seguida.

Número	Função
1	Permite a procura por local ou por coordenadas geográficas
2	Permite selecionar entre três tecnologias de painéis
3	Inserir a potência instalada
4	Tipo de instalação: integrada no edifício ou em terreno aberto
5	Inclinação ( no caso de sistemas fixos)
6	Número de eixos seguidores e respetiva inclinação

Tabela 4.7: Dados de entrada do simulador PVGIS

Para melhor se determinar a precisão do estudo de rentabilidade efetuado, calculou-se o erro relativo associado a cada uma das duas situações, para cada mês, através da expressão (4.3).

$$\Delta_r = \frac{P_t - P_r}{P_r} \times 100 \quad (4.4)$$

**Caso 1** Trata-se de uma instalação com uma potência instalada de 4,2 kW com sistema de seguimento solar. Através das faturas fornecidas pelo cliente, foi possível analisar a produção mensal do sistema, representada na tabela 4.8, bem como a produção mensal estimada inicialmente e a comparação entre os resultados obtidos e os teóricos.

Meses (2009 a 2010)												
Mês	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev
Real	198	654	767	837	954	1047	821	623	459	405	160	545
Teórico	651	601	728	807	842	826	659	509	349	272	381	410
$\Delta(\%)$	-228,6%	8,0%	5,0%	3,5%	11,8%	21,0%	19,8%	18,4%	23,9%	32,9%	-137,9%	24,9%

Tabela 4.8: Comparação das produções mensais (caso 1)

A Figura 4.9 representa o total de produções para este caso:

	$Tot_{kWh}$
Real ( produzido)	7470
Teórico ( previsto)	7034

Tabela 4.9: Total de energia produzida e teórica (caso 1)

Representando graficamente cada uma das produções, obtém-se o seguinte:

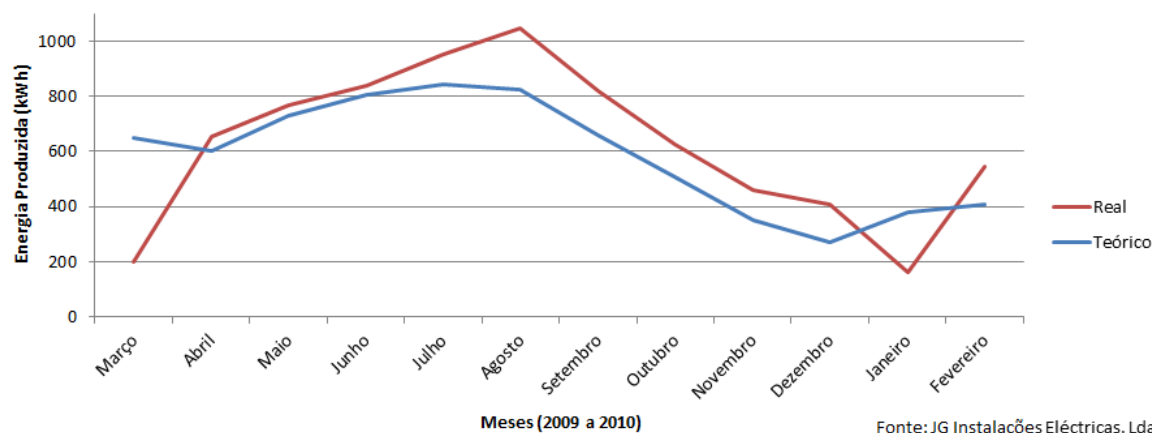


Figura 4.9: Comparação das produções - representação gráfica (caso 1)

Numa primeira análise, os gráficos apresentam, na maior parte do período, a mesma "tendência", exceção feita nos meses de Março, Janeiro e Fevereiro. De realçar que os valores calculados são, tirando os meses anteriormente indicados, inferiores aos que na realidade se obtiveram.

Quando se trabalha com simuladores, há que saber que existem sempre erros associados, ainda para mais quando se tenta retratar o comportamento de algo tão volátil e imprevisível como o clima. Como tal, o simulador assume, por dados históricos, que o clima irá ter um comportamento de acordo com a época do ano em que nos encontramos de acordo com a nossa localização geográfica: uma produção uniformemente distribuída ao longo do ano, mais reduzida no Inverno e mais elevada na altura do Verão. Contudo o ano de registo da produção foi caracterizado por uma produção extremamente baixa nos meses de Janeiro e Março, tendo sido produção acima 20% a 30% dos valores ditos "normais" para a época de maior exposição solar. Nas restantes situações, a simulação conseguiu prever com relativa eficácia (erros inferiores a 10%), sendo de salientar que a simulação "pecou" por defeito, tendo sido obtida uma produção superior em 5% à calculada.

**Caso 2** Trata-se de uma instalação com uma potência instalada de 4,2 kW com as coordenadas geográficas :40°51'36"N e 6°48'1"W e como no caso anterior, também se trata de um sistema com seguimento solar. Pela análise das faturas fornecidas pelo cliente, foi analisada a produção mensal do sistema, representada na tabela 4.10, bem como a produção mensal estimada inicialmente e a comparação entre os resultados obtidos e os teóricos.

Meses (2010 a 2011)												
Mês	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Maió
Real	844	884	870	690	532	367	285	406	430	684	633	768
Teórico	1026	1106	1063	952	774	352	300	551	766	755	696	599
$\Delta$ (%)	17,7%	20%	18,2%	27,5%	31,27%	-4,26%	5%	26,3%	43,8%	9,4%	9,1%	-28,2%

Tabela 4.10: Comparação das produções mensais (caso 2)

A Figura 4.11 representa o total de produções para este caso:

	$Tot_{kWh}$
Real ( produzido)	8940
Teórico ( previsto)	7393

Tabela 4.11: Total de energia produzida e teórica (caso 2)

Representando graficamente cada uma das produções, obtém-se o seguinte:

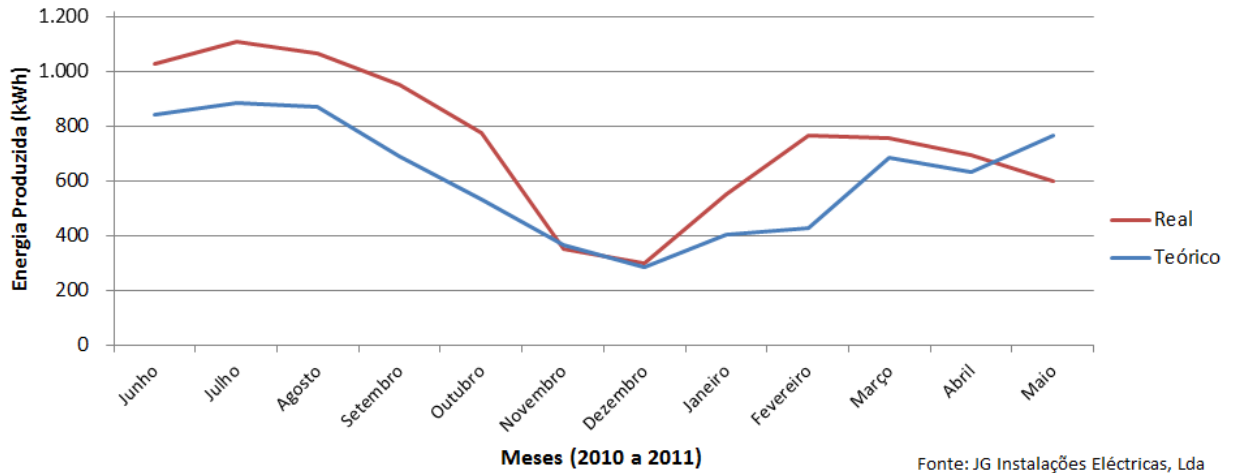


Figura 4.10: Comparação das produções - representação gráfica (caso 2)

Ambos os gráficos apresentam a mesma "variação" mensal, neste caso é caracterizado por uma produção superior no Verão e um decréscimo nos meses de Inverno.

Continua a verificar-se que o simulador apresenta resultados inferiores aos obtidos na prática. Convém referir que esta instalação deixou de poder vender a energia produzida a partir de Abril, dado que produziu mais do que o permitido pelo DL 118-A/2010. No que diz respeito a este ponto, o valor anual que um sistema pode injetar na rede é dado pela expressão :

$$P_{máx\text{injetada}} = 2,4 \times P_{\text{injetada}\text{rede}} \quad (4.5)$$

com,

$$P_{\text{injetada}\text{rede}} = \text{Potência}\text{contratada} / 2 \quad (4.6)$$

e com a seguinte condição

$$P_{\text{injetada}\text{rede}} \leq 3,68\text{kVA}$$

Substituindo (4.5) em (4.4) e sabendo que como potência contratada pelo cliente é de 20,7 kVA, o valor máximo a injetar é de 3,68kVA, temos que a potência máxima que uma micro-geração pode injetar na rede é  $P_{máx\text{injetada}} = 8,83\text{kVA}$ .

**Caso 3** O caso a seguir apresentado trata-se de uma instalação de produção solar fixa com uma potência instalada de 4,2 kW com a seguinte localização: 41°17'47"N e 6°42'14"W . Pela análise

das faturas fornecidas pelo cliente, foi analisada a produção mensal do sistema, representada na tabela 4.12, bem como a produção mensal estimada inicialmente e a comparação entre os resultados obtidos e os teóricos.

Meses (2011 a 2012)												
Mês	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Abr	Maio
Real	727	786	456	480	554	283	199	284	527	582	515	593
Teórico	606	636	656	553	454	316	254	350	361	548	501	577
$\Delta(\%)$	16,6%	19,1%	-43,6%	-15,21%	18,1%	-11,7%	27,6%	-23,3%	31,5%	5,8%	2,7%	2,7%

Tabela 4.12: Comparação das produções mensais (caso 3)

A Figura 4.13 representa o total de produções para este caso:

	$Tot_{kWh}$
Real (produzido)	5986
Teórico (previsto)	5812

Tabela 4.13: Total de energia produzida e teórica (caso 3)

Representando graficamente cada uma das produções, obtém-se o seguinte:

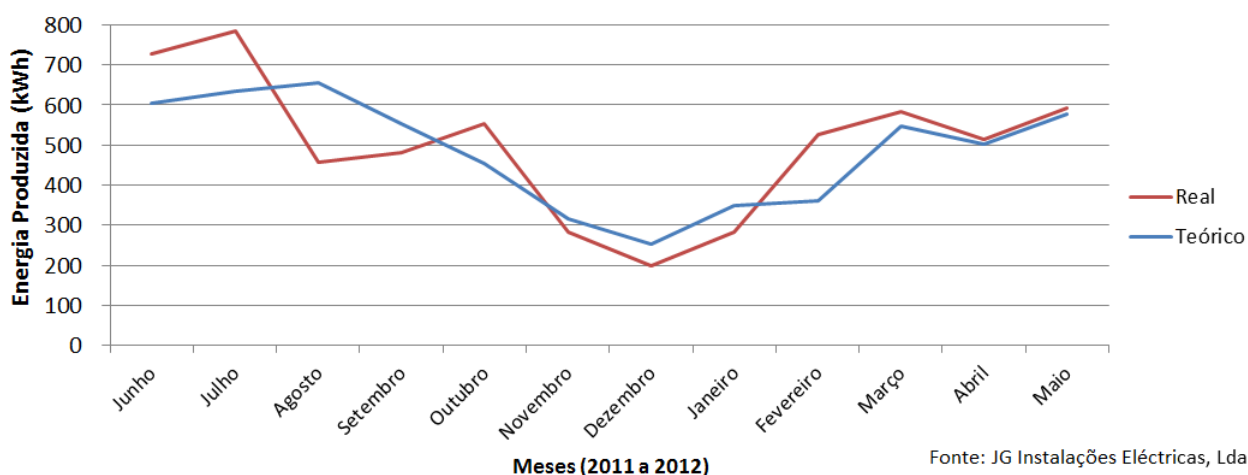


Figura 4.11: Comparação das produções - representação gráfica (caso 3)

Numa primeira análise, os gráficos apresentam, na maior parte do período, a mesma "tendência", exceção feita nos meses de Julho a Setembro. Apesar de serem os meses com maior exposição solar e por isso os meses de maior produção, neste caso o inversor teve alguns problemas de configurações durante o início da produção de energia. Apesar de ter prejudicado a produção, a mesma, numa análise anual não foi inferior ao valor teórico simulado antes da realização da instalação.



## 5 CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

A tecnologia fotovoltaica foi criada à já alguns anos e assume um papel cada vez mais preponderante e fundamental nas apostas dos dirigentes de diversas nações por todo o Mundo como sendo a tecnologia do futuro para combater fenómenos como o aquecimento global (através da diminuição da emissão de gases com efeito de estufa) bem como por prevenir o esgotamento dos diversos recursos naturais ao nosso dispor, não renováveis, que afetam de sobremaneira economia de diversos países. O silício continua a ser o componente fundamental na construção de painéis fotovoltaicos, porém todos os dias surjem notícias de novos materiais revolucionários bem como técnicas de construção promissoras, com maiores eficiências, custos de produção inferiores e conseqüentemente, como se espera, com preços de comercialização inferiores. Enquanto a produção de energia continua a ser aperfeiçoada, a acompanhar tudo isto encontra-se a eletrónica de potência (utilizada para controlar e converter a energia produzida sendo esta etapa realizada nos inversores) em que se têm vindo a diminuir as perdas, sejam elas por efeito de Joule quer na conversão propriamente dita sejam elas de que natureza forem e retirar ainda mais energia de um sistema. Atualmente existe já o sentimento generalizado na população que a aposta nas energias renováveis é crucial para uma economia sustentável e acima de tudo, um Mundo habitável. Contudo até ser atingido o objetivo principal, as fontes de energia renováveis terão de coexistir com as energias proveniente de combustíveis fósseis. Devido aos diversos obstáculos à implantação das energias renováveis, sejam eles económicos (investimento inicial elevado, poupança e retorno algo desconhecidos ao longo do tempo apesar de todas as simulações apontaram para que o investimento tenha um retorno a curto prazo) ou derivados da concorrência de outras tecnologias bem estabelecidas que gozam da proteção de super-potências económicas. Outros obstáculos são as questões de desenvolvimento técnico (o armazenamento continua a ser um problema e a necessitar de ser muito melhorado), foi visto e analisado ao longo deste trabalho, que têm vindo a ser efetuados grandes avanços ao nível desta tecnologia, havendo o esforço por torná-la mais versátil e sobretudo mais eficiente. Portugal encontra-se num local privilegiado para um ótimo aproveitamento solar (é o país Europeu com maior número de horas de exposição solar) , resta apenas explorar este recurso de um modo mais eficaz. Analisado o quadro da produção de energia elétrica através do efeito fotovoltaico em Portugal, verifica-se que existe ainda uma grande margem de manobra para aumentar a capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos. Um melhor aproveitamento dos locais de instalação, seja pelo estabelecimento de parcerias publico-privadas, poderá trazer grandes benefícios quer a nível energético, económico (os sistemas fotovoltaicos são e têm vindo a tornar-se cada vez mais eficientes e rentáveis, e seriam criados postos de emprego), a nível ambiental (tem um papel fundamental nas reduções de emissão de GEE para a atmosfera) e a nível demográfico, pois os locais com maior

exposição e potencial solar apresentam valores de densidade populacional muito reduzidos.

Ao nível da sua dependência energética, Portugal tem implementado diversas políticas energéticas por forma a incentivar a instalação de equipamentos que permitam reduzir a sua dependência energética externa de forma progressiva, o que se tem verificado. Também a aceitação da população é positiva, demonstrando os dados apresentados que existe receptividade a este tipo de tecnologias. Prova disso é o aumento sucessivo de instalações de produção de energia por efeito fotovoltaico de ano para ano em todas as regiões de Portugal Continental e Madeira, permitindo a Portugal ter aumentado no espaço de 4 anos, a potência instalada em sistemas de micro geração para 70MW. Em termos económicos, mais que evidenciar os proveitos monetários que a aposta na tecnologia fotovoltaica oferece a quem investe neste setor, convém salientar o resultado da balança comercial (menos combustíveis adquiridos ao exterior, maior poupança), como apresentado no capítulo 3, e o emprego gerado. Das maiores vantagens deste último ponto, de ressaltar a criação empresas dedicadas a esta área de negócio que levaram à criação de postos de trabalho em diversas áreas de negócio, gerando riqueza e contribuir para um aumento do PIB e uma diminuição do desemprego. Temos assistido a uma crescente preocupação com o estado do clima no Mundo. Diversos pactos foram assinados e as medidas estão se a tornar cada vez mais restritas por forma a tentar conter e inverter a tendência da última década relativamente ao aumento da temperatura global e do consumo de recursos naturais. Até à data de hoje, Portugal tem cumprido com os planos estabelecidos perante a União Europeia e o Mundo (Protocolo de Quioto). Tem vindo a reduzir as suas emissões de GEE e, à data de 2009, encontrava-se "somente" 8% acima do seu objetivo de redução de emissões de gases nocivos, até 2020. Aliado a isso, as políticas que têm vindo a ser desenvolvidas conjugadas com o aumento de parcela de energia de origem renovável indicia que Portugal irá atingir o objetivo antes do prazo definido. Isto afetará de forma positiva não só o ambiente, mas também a balança comercial do Estado Português, que além de não ser sancionado economicamente por incumprimento das metas definidas, não precisará de adquirir licenças de emissão de GEE.

No estudo de caso desenvolvido, foi pretendido caracterizar e analisar a evolução das seguintes variáveis: custos de uma instalação, custo médio unitário de um kW, a energia que um sistema poderá produzir. Analisando os dados recolhidos entre 2007 e 2012, verifica-se uma constante diminuição do valor de cada uma das variáveis analisadas ao longo dos anos, tendo o valor diminuído desde o início da recolha de dados aproximadamente 57% no valor do custo de uma instalação fotovoltaica, e no custo unitário por kW. No sentido inverso, a produção de energia teórica aumentou aproximadamente 48%. Da mesma forma, pretendeu-se determinar a rentabilidade de um investimento através da análise dos diferentes indicadores económicos: VAL (Valor Atual Líquido), da TIR (Taxa Interna de Rentabilidade) bem como determinar o período de retorno do capital investido.

Utilizando um conjunto de dados foi possível construir uma base de dados com informações relativas a 25 instalações, integrando sistemas fixos e sistemas seguidores. Verificou-se que, regra geral, o custo das instalações decresce anualmente a uma taxa média global de 15% no caso dos sistemas fotovoltaicos fixos (14% no caso dos seguidores) comparativamente ao ano anterior. A massificação da produção de painéis solares, a concorrência entre fabricantes mas também um crescendo da procura, podem ser apontados como alguns dos principais motivos que justificam os dados obtidos anteriormente. Um dos objetivos passava por determinar se a energia adicional produzida por um sistema seguidor compensava o superior investimento inicial, comparativamente a um sistema fixo. Este valor adicional é, em média, 18% mais elevado comparativamente ao custo de uma instalação fixa. Este aumento de custo está diretamente relacionado como o custo da estrutura.

Nos casos práticos apresentados, verificou-se que todos eles excederam, no primeiro ano de funcionamento, a simulação efetuada. É de grande vantagem ter ao dispor uma ferramenta gratuita que consiga calcular, à partida, a energia teórica que uma instalação poderá produzir. Houve instalações que obtiveram uma produção mais elevada do que o permitido pelo Decreto-Lei 118A-2010, tendo continuado a produzir para a rede elétrica porém sem qualquer remuneração.

Verificou-se que os diversos sistemas fotovoltaicos de micro geração apresentam rentabilidades médias de 42 765,67 € no sistema fixo e de 55 743,87 € nos sistemas seguidores solares. Dado que todos os anos há alterações na inflação, no custo do material e nas próprias remunerações pagas aos produtores de energia através da micro-geração, verifica-se o mercado tem sabido adaptar-se ao diversos DL que regulamentam o sector. O valor médio adicional entre as duas soluções fotovoltaicas seria, ao fim de 25 anos, 12 978,2 €. Se atendermos que a remuneração é mensal, em 300 meses (25 anos), o proprietário de um sistema fotovoltaico veria a sua fatura acrescida de aproximadamente 43€. Se atendermos que o custo adicional de uma estrutura seguidora da luz solar relativamente a uma estrutura convencional é, em média 3000€, o valor adicional na fatura cairia para cerca de 33€. Atendendo que um sistema seguidor de energia solar necessita de uma manutenção superior devidos aos elementos mecânicos que o compõem, comparativamente ao sistema fixo (mais concretamente sistemas mecânicos, motores e toda a eletrónica que faz o seguimento solar), 340€ podem não ser suficientes para garantir uma mais-valia do sistema seguidor, pese embora os fabricantes ofereçam garantias de alguns anos. Em jeito de conclusão, até à data, 2/3 das instalações instaladas pela empresa JG Instalações Eléctricas são sistemas seguidores, não tendo ocorrido avarias de qualquer espécie.

Como perspectivas futuras, poder-se-ia aprofundar o estudo realizado através da análise de mais instalações, e utilizar mais variáveis para comparação, como seja o valor dos componentes da instalação e tentar obter dados ambientais mais concretos relativamente à situação de Portugal, a nível de emissões de GEE.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Referências

- [1] OECD/IEA. (2011). *Technology Roadmap Concentrating Solar Power*. [Versão Eletrónica]. France
- [2] Lacasta, N e Barata, P. (1999). *O PROTOCOLO DE QUIOTO SOBRE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: Análise e Perspectivas*. Euronatura. Lisboa
- [3] United Nation (1998). *KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE*. Acedido em 06-04-2012, em [http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/items/2830.php](http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php)
- [4] OECD/IEA. (2007). *Climate Policy Uncertainty and Investment Risk*. [Versão Eletrónica]. France
- [5] Jenny, Nelson (2003). *The Physics of the solar cells*. Imperial College Press. United Kingdom
- [6] Wylie, Andrew. (2009). *The first monolithic integrated circuits*. Acedido em 22-04-2012, em <http://homepages.nildram.co.uk/~wylie/ICs/monolith.htm>
- [7] Castro, Rui (2011). *Uma introdução às energias renováveis: eólica, fotovoltaica e mini-hídrica*. Instituto Superior Técnico Press. Lisboa
- [8] NASA. (2012). Sítio da Internet, acedido em 17-06-2012 em, <http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Display=Facts&Object=Sun>
- [9] VA. (2007). *Projecto Proclira - Radiação Solar e Terrestre*. Universidade de Évora. Évora
- [10] Renewable Energy World. (2010). Sítio da Internet acedido em 10-07-2012 em <http://www.renewableenergyworld.com>
- [11] IST, DGS, ALTENER. (2004). *Energia fotovoltaica – manual sobre tecnologias, projeto e instalação*. [Versão Eletrónica]. IST PRESS. Lisboa
- [12] Morais, Josué. (2009). *SISTEMAS FOTOVOLTAICOS - DA TEORIA À PRÁTICA*. Engbook. Lisboa
- [13] Joint Research Centre - Institute for Energy and Transport. (2012). Sítio da Internet acedido em 15-08-2012 em <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [14] Mecasolar. (2012). Sítio da Internet acedido em 9-07-2012 em <http://www.mecasolar.com>

- [15] Castro, Rui (2008). *Energias Renováveis e Produção Descentralizada - Introdução à energia fotovoltaica*. 2ª edição. Instituto Superior Técnico. Lisboa
- [16] Kurtz, Sarah. (2006). *High-efficiency, multijunction solar cells for large-scale solar electricity generation*. National Renewable Energy Laboratory. [Versão Eletrónica]. Acedido em 13-05-2012, em <http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/44201.pdf>
- [17] OECD/IEA. (2011). *Co-generation and renewables - solutions for a low-carbon energy future*. [Versão Eletrónica]. France
- [18] OECD/IEA. (2011). *World Energy Outlook*. [Versão Eletrónica]. France
- [19] Coeptum (2012). Sítio da Internet acedido em 17-06-2012 em <http://www.coeptum.pt>
- [20] Kenber, M., Haugen, O. e Cobb, M (2009). *The Effects of EU Climate Legislation on Business Competitiveness*. 1ª Edição. GMF. New York
- [21] Eurostat. (2012). Sítio da Internet acedido em 13-08-2012 em <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>
- [22] Santos, Paulo. (2004). *National Survey Report of PV Power Applications in Portugal*. ADENE/IEA. 1ª Edição. Lisboa
- [23] OECD. (2012). Sítio da Internet, último acesso em 19-09-2012 em <http://www.oecd.org>
- [24] REN (2012). *Dados Técnicos da REN*. [Versão Eletrónica]. Lisboa
- [25] Renováveis na hora. (2012). Sítio da Internet, último acesso em 01-08-2012 em <http://www.renovaveisnahora.pt/web/srm/legislacao>
- [26] PV Employment (2010). *SOLAR PHOTOVOLTAIC EMPLOYMENT IN EUROPE*. [Versão Eletrónica]. United Kingdom
- [27] OECD/IEA. (2009). *TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS: Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2009*. [Versão Eletrónica]. France 2009
- [28] Mendonça, Maria (2012). *O debate em torno da crise climática*. [Versão Eletrónica]. Assembleia Popular. Lisboa
- [29] WorldWatch Institute. (2012). Sítio da Internet, último acesso em 17-07-2012 em <http://www.worldwatch.org/node/5821>
- [30] Comissão Europeia. (2008). *Proposal for a recast of the Energy Performance of Buildings Directive: Summary of the Impact Assessment*. [Versão Eletrónica]. UE

- [31] Carbono Zero. (2012). Sítio da Internet. Último acesso em 28-03-2012 em <http://www.carbono-zero.com/>
- [32] OECD/IEA. (2011). *CO2 EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION*. [Versão Eletrónica]. France
- [33] Ghani-Eneland, Meera et al. (2009). *Low Carbon Jobs for Europe: Current Opportunities and Future Prospects*. WWF. [Versão Eletrónica]
- [34] European Climate Fundation (2009). *Breakthrough or Breakdown? How the EU action could resolve the climate deadlock*. GLOBE EU. France
- [35] Makippa, Arttu et al. (2008). *Competitive distortions and leakage in a world of different carbon prices*. European Parliament. [Versão Eletrónica].
- [36] Camus, C. e Eusébio, E. . (2007). *Gestão de Energia - Avaliação Económica de Projectos*. ISEL. Lisboa
- [37] DGES. (2011). *Estatísticas Rápidas Renováveis*. Último Acesso em 25-7-2012 em <http://www.dgge.pt/default.aspx?cr=10170>
- [38] OECD/IEA. (2011). *Co-generation and renewables - solutions for a low-carbon energy future*. [Versão Eletrónica]. France
- [39] López, N. et al. (2011). *Engineering the Electronic Band Structure for Multiband Solar Cells*. APS. [Versão Eletrónica]. USA