



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

**Análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos
em operação**

David Rodrigues Vieira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Luís Carlos Carvalho Pires
Co-orientador: Prof. Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva

Covilhã, Outubro de 2013

Agradecimentos

A empresa Solar Earth, Lda os agradeço pela disponibilização das características referentes as unidades fotovoltaicas de microprodução que deu fundamento ao desenvolvimento desta dissertação. Agradeço a oportunidade pela realização do estágio curricular nas suas instalações bem como a disponibilidade e atenção prestada pelos operários.

Ao Professor Doutor Luís Carlos Carvalho Pires agradeço por todo este percurso, pela atenção, disponibilidade e acompanhamento no desenvolvimento da dissertação que se traduziu no meu crescimento pessoal e académico.

Agradeço toda a colaboração efectuada pelo Professor Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva.

Partilho felicidade desta conquista com os meus amigos porque que não seria possível chegar até aqui sem o apoio deles ao longo destes anos. Os meus agradecimentos a todos os meus amigos que foi fazendo ao longo deste percurso, que muito contribuíram para o meu crescimento, que estiveram comigo nos momentos bons e menos bons. Agradeço em especial ao Ruxanda Godina e a Radu Godina pelo contributo no desenvolvimento desta dissertação.

Por último e não menos importante, os meus agradecimentos à família, nomeadamente aos meus pais pelo grande esforço efectuado e pelo apoio que tem vindo a prestar ao longo destes anos.

Resumo

O interesse pelas fontes de energia renováveis tem conquistado ao longo dos anos uma grande importância no mercado mundial. Esse interesse deve-se, essencialmente, ao carácter finito das fontes de combustíveis fósseis e aos efeitos do seu consumo no ambiente. A produção de energia recorrendo a recursos renováveis, como o vento, o sol, os rios e os mares, representa um importante meio alternativo que assume cada vez mais relevo.

Também em Portugal se tem apostado na utilização das fontes de energia renováveis. A introdução da microprodução no nosso país é um claro exemplo dessa aposta, consubstanciado com a implementação do Decreto-Lei nº 363/2007. A incorporação das energias renováveis no quadro energético nacional tem permitido a Portugal reduzir a sua dependência energética face ao exterior, reduzindo assim o saldo importador energético. Têm, igualmente, ajudado no cumprimento dos compromissos assumidos no contexto das políticas europeias para o combate às alterações climáticas e tem permitido criar emprego e riqueza no nosso país.

O desenvolvimento desta dissertação incide precisamente sobre a avaliação de unidades fotovoltaicas de microprodução em funcionamento. Tratam-se de instalações de pequena escala para a produção descentralizada de energia através da conversão directa da radiação solar em energia eléctrica. São analisadas no presente trabalho 23 unidades fotovoltaicas de microprodução ligadas à rede. Foi recolhida informação em cada uma dessas unidades relativamente à sua constituição, à energia total produzida e à incidência de anomalias registadas no seu funcionamento. Foram calculados e discutidos parâmetros de desempenho, o que permitiu retirar um conjunto de conclusões relativas ao dimensionamento e funcionamento deste tipo de unidades.

Palavras-chave

Energias renováveis, células fotovoltaicas, unidades fotovoltaicas de microprodução.

Abstract

The interest in renewable energy has obtained over the years a great importance in the world market. That interest is mainly due to the finite nature of fossil fuel sources and to the effects of their consumption on the environment. The production of energy using renewable resources, such as wind, the sun, the rivers and the seas, is an important alternative way that is assuming every day more relevance.

Portugal was one of the countries that decided to focus on the use of renewable energy sources. The introduction of microgeneration in our country is a clear example of this commitment, implementation with the Decreto-Lei n° 363/2007. The incorporation of renewable energy in the national energy framework has allowed Portugal to reduce its energy dependence from the outside, reducing energy the import balance. It was also important for the fulfillment of the commitments undertaken in the context of the European Union policies to combat climate change and has allowed to the creation of jobs and wealth in our country.

The development of this dissertation focuses specifically on the evaluation of microgeneration photovoltaic units in normal operation. This kind of facilities is used for small-scale decentralized energy production through the direct conversion of sunlight into electricity. In the present study 23 photovoltaic microgeneration units connected to the network are analyzed. Information was collected on each unit concerning its constitution, the total energy produced and recorded incidence of anomalies in its functioning. That information was analyzed and some performance parameters were calculated and discussed, wiping out a set of conclusions useful for the design and operation of such kind of units.

Keywords

Renewable energy, Photovoltaic cells, photovoltaic units microproduction.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Palavras-chave	v
Abstract.....	vii
Keywords	vii
Índice	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Acrónimos	xvii
Nomenclatura	xviix
Capítulo 1	1
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento da dissertação	1
1.2 Revisão bibliografia	2
1.3 Motivação e objectivos	6
1.4 Organização da dissertação	7
Capítulo 2.....	9
2 A microprodução fotovoltaica em Portugal	9
2.1 Energias renováveis	9
2.2 Energia solar.....	12
2.3 A energia solar fotovoltaica	16
2.4 Microprodução fotovoltaica	17
2.4.1 Objectivo da introdução da microprodução em Portugal	17
2.4.2 Vantagens e desvantagens da microprodução (enquanto forma de produção descentralizada)	18
2.4.3 Legislação associada à microprodução	20
2.5 Nota conclusiva.....	24

Capítulo 3	25
3 Aspectos técnicos de uma unidade fotovoltaica de microgeração.....	25
3.1 Elementos que constituem uma unidade fotovoltaica de microprodução	25
3.2 Planeamento de uma unidade fotovoltaica de microprodução.....	45
3.3 Dimensionamento de uma unidade fotovoltaica de microprodução.....	46
3.4 Parâmetros de avaliação das unidades fotovoltaica de microprodução	59
3.5 Factores prejudiciais ao funcionamento de uma unidade fotovoltaica de microprodução	65
3.6 Instalação e manutenção de uma unidade fotovoltaica de microprodução	68
3.7 Manutenção	72
3.8 Nota conclusiva.....	76
Capitulo 4	77
4 Análise de unidades fotovoltaicas de microprodução em pleno funcionamento.....	77
4.1 Caracterização das unidades fotovoltaicas de microprodução estudadas	77
4.2 Comparação e análise das unidades fotovoltaicas de microprodução estudadas	85
4.3 Cálculo de parâmetros de avaliação e discussão dos resultados obtidos	91
4.3.1 Apresentação dos parâmetros da irradiação para as unidades em estudo	91
4.3.2 Cálculo de parâmetros de avaliação e discussão dos resultados obtidos.....	94
4.4 Nota conclusiva.....	100
Capítulo 5	101
5 Conclusão	101
Bibliografia.....	105

Lista de Figuras

Figura nº 2.1: Perspectiva de evolução da produção mundial de energia eléctrica até 2040.	11
Figura nº 2.2: Irradiação na Europa. (Fonte: Portal das energias renováveis)	13
Figura nº 2.3: Percurso solar para Portugal continental.	14
Figura nº 2.4: Localização geográfica de Portugal. (Fonte: Greenpeace (2006))	15
Figura nº 3.1: Sistema de microprodução fotovoltaico ligado à rede. (Fonte: Certiel).....	26
Figura nº 3.2: Célula fotovoltaica. (Fonte: Morais (2009)).....	28
Figura nº 3.3: Circuito representativo de uma célula fotovoltaica.	31
Figura nº 3.4: Curva característica corrente/tensão de uma célula fotovoltaica. (Fonte: Morais (2009)).....	32
Figura nº 3.5: Curvas característica da corrente/tensão para o ponto de máxima potência de um módulo fotovoltaico. (Fonte: Freitas (2006)).....	32
Figura nº 3.6: Factor de forma das células fotovoltaicas (Fonte: Freitas (2006))	33
Figura nº 3.7: a) Célula Fotovoltaico; b) Módulo Fotovoltaico; c) Gerador Fotovoltaico.....	36
Figura nº 3.8: Módulo Fotovoltaico: a) ligação em série; b) ligação em paralelo.	36
Figura nº 3.9: Inversor autocontrolado com transformador. (Fonte: Morais (2009))	38
Figura nº 3.10: Organigrama referente às estruturas aplicadas nas unidades fotovoltaicas	42
Figura nº 3.11: Unidade fotovoltaica com duplo seguimento solar: Norte-sul, Este-Oeste. (Fonte: Morais (2009))	43
Figura nº 3.12: Díodos de desvio e de fileira. (Fonte: Morais (2009))	45
Figura nº 3.13: Apresentação dos resultados dos cálculos e das simulações efectuadas referente às estimativas de produção.	64
Figura nº 3.14: Comparação da energia real produzida calculada e obtida pelas simulações para as quatro configurações propostas.....	64
Figura nº 3.15: Disposição dos módulos relativamente a neve: a) Paralelamente; b) Perpendicular. (Fonte: Morais (2009)).....	65
Figura nº 3.16: Curvas característica potência em função da temperatura dos módulos. (Fonte: Morais (2009))	66
Figura nº 3.17: Efeito da convecção nos módulos FV. (Fonte: Morais (2009))	66
Figura nº 3.18: Análise da distância entre fileiras. (Fonte: Morais (2009)).....	71
Figura nº 3.19: Circuito eléctrico de uma unidade fotovoltaica de microprodução. (Fonte: Solar Earth, Lda.)	74
Figura nº 4.1: Energia produzida pelas unidades fotovoltaicas de microprodução em estudo. ..	88
Figura nº 4.2: Média de energia produzida pelas unidades fotovoltaicas de microprodução em estudo.	89
Figura nº 4.3: Número de incidências das unidades fotovoltaicas.	90
Figura nº 4.4: Tempo das incidências das unidades fotovoltaicas.	90
Figura nº 4.5: Distribuição da irradiação ao longo do ano para unidades fixas e unidades com seguimento solar de 1 e 2 eixos.....	92
Figura nº 4.6: Índice de desempenho das unidades fotovoltaicas	97
Figura nº 4.7: Comparação da média diária de energia produzida e do factor de produção das unidades fotovoltaicas.....	98
Figura nº 4.8: Factor de dimensionamento do inversor das unidades fotovoltaicas.....	99

Lista de Tabelas

Tabela nº 2.1: Evolução da microprodução fotovoltaica para o regime bonificado entre 2008 e 2009.....	23
Tabela nº 2.2 Evolução da microprodução fotovoltaica para o regime bonificado entre 2010 e 2013.....	23
Tabela nº 2.3: Evolução histórica da produção de energia eléctrica por via fotovoltaica em Portugal Continental (Fonte: DGEG, (Julho, 2013))	24
Tabela nº 3.1: Inversor: a) Kaco; b) SMA.	53
Tabela nº 3.2: Módulos: a) Jinko; b) YGE.....	54
Tabela nº 3.3 Apresentação dos resultados dos cálculos e das simulações efectuadas referentes ao dimensionamento.	58
Tabela nº 3.4: Apresentação dos resultados dos cálculos e das simulações efectuadas referente aos parâmetros de produção.	63
Tabela nº 4.1: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº1.	78
Tabela nº 4.2: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº2.	78
Tabela nº 4.3: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº3.	78
Tabela nº 4.4: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº4.	79
Tabela nº 4.5: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº5.	79
Tabela nº 4.6: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº6.	79
Tabela nº 4.7: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº7.	80
Tabela nº 4.8: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº8.	80
Tabela nº 4.9: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº9.	80
Tabela nº 4.10: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº10.	81
Tabela nº 4.11: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº11.	81
Tabela nº 4.12: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº12.	81
Tabela nº 4.13: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº13.	82
Tabela nº 4.14: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº14.	82
Tabela nº 4.15: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº15.	82
Tabela nº 4.16: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº16.	83
Tabela nº 4.17: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº17.	83
Tabela nº 4.18: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº18.	83
Tabela nº 4.19: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº19.	84
Tabela nº 4.20: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº20.	84
Tabela nº 4.21: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº21.	84
Tabela nº 4.22: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº22.	85
Tabela nº 4.23: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº23.	85
Tabela nº 4.24: Características das unidades fotovoltaicas de microprodução em estudo.	86
Tabela nº 4.25: Dados relativos ao funcionamento das unidades fotovoltaicas de microprodução em estudo.	87
Tabela nº 4.26: Distribuição mensal da irradiação para as condições correspondentes às unidades fixas e unidades com seguimento estudadas (Base de dados PVGIS-CMSAF)	92
Tabela nº 4.27: Penalização na irradiação devido a desvios na orientação/inclinação face ao sistema ideal fixo. (Base de dados PVGIS-CMSAF).....	93
Tabela nº 4.28: Parâmetros de avaliação das unidades fotovoltaicas de microprodução fixas. ...	95
Tabela nº 4.29: Parâmetros de avaliação das unidades fotovoltaicas com seguimento solar.....	96

Lista de Acrónimos

AM	Massa de ar
AC	Corrente alternada
BT	Baixa tensão
CA	Circuito-aberto
CC	Curto-circuito
CE	Certificado europeu
CO ₂	Dióxido de carbono
DC	Corrente contínua
DGEG	Direcção-geral de energia e geologia
D.L.	Decreto lei
ERIE	Entidade regional Inspectora de instalações eléctricas
EQ	Equação
EUA	Estados Unidos da América
FER	Fontes de energia renovável
FV	Gerador fotovoltaico
GEE	Gases efeito de estufa
GRP	Gabinete de relações públicas
IRS	Imposto sobre o rendimento das pessoas singulares
IVA	Imposto sobre o valor acrescentado
NE	Norma Europeia
NP	Norma Portuguesa
RESP	Rede eléctrica de serviço público
SRM	Sistema de registo da microprodução
MPP	Ponto de potência máxima
TFT	Tecnologia de película fina
UBI	Universidade da Beira Interior
EU	União Europeia
UV	Ultra violeta

Nomenclatura

A_{gerador}	Área do gerador	m^2
A_S	Área	m^2
C_{Bm}	Constante de Boltzmann	J/K
d	Distancia entre os módulos	m
E_{idial}	Energia ideal do sistema	kWh
E_{real}	Energia real do sistema	kWh
FDI	Factor de dimensionamento do inversor	kW/kWp
FF	Factor de forma	-
FP	Factor de produção	kWh/kWp
H_{eq}	Horas equivalentes	kWh/ m^2
I	Corrente	A
I_{CC}	Corrente em curto-circuito	A
I_{DS}	Corrente standard	A
I_L	Corrente no LED	A
I_P	Corrente em paralelo	A
I_{max}	Corrente máxima	A
I_{FI}	Corrente de nóculo ou fileira	A
ID	Índice de desempenho	%
I_0	Corrente de saturação	A
L_M	Comprimento dos condutores	m
L	Comprimento do módulo	m
N_{max}	Número máximo de módulos em série	-
N_{min}	Número mínimo de módulos em série	-
N_{fileiras}	Número máximo de fileiras ligadas e paralelo	-
P	Potência	W
P_{AC}	Potência em corrente alternada	W
P_{DC}	Potência em corrente contínua	W
P_{eDC}	Potência de entrada do inversor	W
P_{FI}	Potência de fileira	W
P_{FV}	Potência do gerador fotovoltaico	W
P_{in}	Potência de entrada	W
$P_{\text{inv.}}$	Potência do inversor	W
P_{max}	Potência máxima	W
P_{out}	Potência de saída	W
P_{sDC}	Potência de saída do inversor	W
P_T	Potência teórica	W
q	Carga do electrão	J/K
R	Resistência	Ω
R_S	Resistência em série	Ω
R_P	Resistência em paralelo	Ω
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}/\text{K}$
V	Tensão	V
V_{CA}	Tensão em circuito-aberto	V
V_{CA} (módulo a -10°C)	Tensão máxima em circuito-aberto a -10°C	V

V_{max}	Tensão máxima	V
V_{MPP}	Tensão no ponto máximo de potência	V
V_{MPP} (módulo a -70°C)	Tensão mínima em curto-circuito a 70°C	V
δ	Condutibilidade do material dos cabos	Ωm
α	Inclinação do módulo	Graus
β	Ângulo mínimo do sol	Graus
ϕ	Ângulo azimute ou orientação	Graus
η	Eficiência/Rendimento	%
η_{Cabos}	Eficiência dos cabos	%
$\eta_{Gerador}$	Eficiência gerador	%
$\eta_{Inversor}$	Eficiência do inversor	%
$\eta_{Módulo}$	Eficiência do módulo	%
η_{Temp}	Eficiência devido ao efeito da temperatura	%

Capítulo 1

1 Introdução

O desenvolvimento deste capítulo tem como objectivo a introdução e o enquadramento da temática associada às unidades fotovoltaicas de microprodução, visto tratar-se do tema principal do desenvolvimento desta dissertação. Desse modo, é efectuada uma abordagem aos recentes desenvolvimentos nesta área. Posteriormente, descreve-se de forma sucinta a estrutura da presente dissertação.

1.1 Enquadramento da dissertação

O crescimento da Humanidade tem levado a uma dependência e aumento consecutivo do consumo de energia, que, durante muitos anos, foi sustentado com o aumento da exploração dos combustíveis fósseis. A grande dependência destes tem levado à sua escassez, originando um aumento significativo do custo da energia, uma vez que, actualmente é um meio imprescindível para o dia-a-dia das sociedades. Os sucessivos aumentos do custo têm gerado no mercado várias crises energéticas, como por exemplo a crise petrolífera de 1983, como refere GTES (2004). As consecutivas crises têm alertado países por todo Mundo para a necessidade da procura de alternativas que satisfaçam as necessidades energéticas.

As fontes de energias renováveis surgem como alternativa face ao aumento do consumo, mas não só, pois permitem a diminuição da emissão de CO₂ para a atmosfera, um crescimento sustentado do sector da energia e da economia dos países que adoptam este caminho. As fontes de energia renovável são fontes de energia “inesgotável” que se encontram em todo o planeta e em diferentes recursos, quantidades ou intensidades, o que permite contribuir para a satisfação de parte das necessidades energéticas de quem as implementa.

O Tratado Quioto de 11 de Dezembro de 1997, em Quioto, Japão, veio impulsionar a mudança do paradigma energético, tornando possível que vários países estabelecessem metas para a redução da CO₂, principal responsável pelas alterações climáticas que se tem feito sentir nos últimos anos e que tem originado insegurança quanto ao futuro do Planeta Terra. Estas medidas vieram impulsionar a implementação da utilização de fontes de energia renovável.

Pelo facto de Portugal não apresentar fontes de energia de origem fóssil, sempre foi energeticamente muito dependente do exterior. No entanto apresenta grande diversidade de fontes de energia renovável que podem ser exploradas. Com as metas estabelecidas, Portugal adoptou, desde então, políticas energéticas que vêm favorecendo a implementação destas fontes de energia não poluentes, permitindo que Portugal não seja energeticamente tão dependente do exterior. O Decreto-Lei 363/2007, de 2 de Novembro é o testemunho dessa aposta, que contribui para que Portugal, entre o período de 2000 e 2011, diminuísse a sua dependência energética de 84,9% para 77,5%, segundo os dados apresentados pela Eurostat.

A energia solar fotovoltaica é uma forma de energia renovável, que tem verificado um grande interesse e aposta por parte de vários países, não só na sua implementação, mas também numa contínua melhoria da sua eficiência, diminuição dos custos de produção e aumento do tempo de vida útil desta tecnologia.

Portugal tem apostado bastante neste mercado, que tem revelado o maior crescimento nos últimos anos, beneficiando das condições geográficas que detém, visto apresentar um grande potencial natural deste recurso comparativamente com os países membros da União Europeia (EU). Esse crescimento tem-se verificado muito por causa dos apoios institucionais postos em prática. Estes têm sido direccionados para este mercado por parte do país, ao criar o mercado da microprodução e miniprodução com legislação simplificada e com benefícios económicos e fiscais, tornando o mercado acessível, seguro e adequado para os investidores. A aposta nas fontes de energia renovável não só tem vindo a permitido que Portugal alcance as metas, os compromissos estabelecidos com a União Europeia, como também têm permitido a diminuição da dependência energética, a diminuição da emissão de CO₂ e o aumento da eficiência energética.

1.2 Revisão bibliografia

As preocupações ambientais e a incerteza dos mercados de abastecimento de energia têm gerado novas oportunidades para a exploração das tecnologias associadas aos recursos renováveis. A energia solar é das mais abundantes, inesgotável e limpa de todos os recursos energéticos até hoje, sendo a tecnologia fotovoltaica uma das que melhor aproveita a energia solar, como refere Parida et al. (2011). A conversão fotovoltaica consiste na conversão directa da radiação em energia eléctrica, sem qualquer mecanismo móvel, concedendo grande durabilidade à tecnologia associada. As unidades fotovoltaicas de microprodução, apesar de serem um conceito que surgiu muito recentemente em Portugal, baseiam-se na aplicação de conhecimentos e tecnologias de radiação solar que têm sido estudadas há muitos anos. Estas tecnologias ainda hoje têm merecido grande investigação, com o objectivo de aumentar o número de aplicações, aumentar o rendimento, a flexibilidade, a durabilidade, os processos de fabrico, etc..

Os estudos que se têm feito sentir mais nesta área de aplicação estão relacionados com as células fotovoltaicas. As células de primeira geração consistem em células de silício cristalino rígidas, que hoje em dia dominam o mercado, apresentando um processo de produção e aplicação consideravelmente caros. As células de segunda geração consistem em perfiz finos e flexíveis, apesar de processos menos caros, apresentam menores eficiências. Espera-se que as células da terceira geração permitam aumentar a eficiência de conversão, reduzir os custos fabrico e de aplicação. As células de terceira geração baseiam-se em materiais semicondutores que podem ser de alguns micrómetros, ou ainda mais pequenos que um micrómetro, com maiores capacidades de absorção da luz, depositado sobre uma camada de suporte de baixo custo, tais como vidro, metal, ou folha de plástico. Espera-se que a tecnologia de deposição dos materiais semicondutores conduza a processos de fabrico mais rápidos e mais baratos, como referem Asim et al. (2012).

As células solares de polímeros surgiram na terceira geração das células fotovoltaicas, e espera-se que alcancem maior número de aplicações. Apesar desta tecnologia ainda estar em amadurecimento, a sua eficiência varia de 5% a 20%. O processo de fabrico consiste em várias técnicas de impressão sobre substratos de plástico, concedendo-lhes flexibilidade e resistência à corrosão. Devido à simplicidade e rapidez das técnicas de impressão na produção das células, o facto de utilizarem menor quantidade de material e serem comercializadas em rolos permite a redução significativa do custo de produção, como refere Espinosa et al. (2011). As células orgânicas e híbridas assentam nesta tecnologia de aplicação.

Os baixos custos de produção das células orgânicas são alcançados graças à utilização de técnicas rápidas e simples, como a impressão a jacto de tinta, ou outras técnicas, que permitem que estas cheguem a alcançar os 10% de eficiência. As células híbridas estão, também, a ser alvo de bastante interesse, visto poderem vir a alcançar elevadas eficiências. As células híbridas são constituídas pela conjugação de diferentes camadas orgânicas e inorgânicas. Uma vez que existem limitações da tecnologia, tais como o controlo da nano morfologia e as propriedades químicas da superfície das nano partículas, não tem sido possível que as experiencias realizadas ultrapassem muito a eficiência de 5%, como refere Chandrasekaran et al. (2011). As células híbridas vieram conjugar os benefícios das células orgânicas e dos substratos inorgânicos. Estes últimos vêm permitir que células híbridas tenham maior durabilidade, para além de proporcionarem a escala complementar da absorção do espectro solar, possibilitando converter maiores quantidades de energia. O aumento da eficiência dá-se porque as matérias inorgânicas concedem às células híbridas maior estabilidade dos electrões-lacunas, e este permitem um bom alinhamento das nano estruturas, como refere Wright & Uddin (2012)

Com a continuação do desenvolvimento das tecnologias fotovoltaicas e do mercado, espera-se que nas próximas décadas se desenvolvam mecanismos eficientes que consigam absorver toda a gama do espectro solar incidente, convertendo-a em energia eléctrica, como refere Assim et al. (2012).

Têm surgido vários estudos referentes às diferentes vantagens na instalação de seguidores nos sistemas solares fotovoltaicos. Estes estudos comparam as diferentes produções de energia dos sistemas fixos e móveis, quer de um ou dois eixos. Como é de esperar, os sistemas que possuem seguimento solar de dois eixos apresentam maior conversão de energia, chegando a uma média anual de 30% quando comparados com os sistemas fixos. Como tem maior custo de implementação, menor durabilidade e pelo facto de estes necessitarem de maiores cuidados de manutenção, é necessário fazer uma análise destes custos para verificar se se justifica a implementação de seguidores, como refere Eke & Senturk (2012). Nos estudos realizados por Koussa et al. (2011), verificou-se também que a quantidade adicional de energia eléctrica produzida pelos sistemas fotovoltaicos com seguidores de dois eixos dependem principalmente do sistema de seguimento solar utilizado, mas também das condições climatéricas e do período do ano, verificando que, em dias de grande incidência solar podem aumentar a produção de energia para valores próximos dos 40%, mas, em dias desfavoráveis estes apresentam produções pouco significativas quando comparadas com os sistemas fixos. Os sistemas de seguimento solar de um eixo apresentam menos quantidade de energia eléctrica produzida, quando comparados com os de dois eixos, como é de esperar. Dos sistemas de um eixo os que apresentam melhores resultados ao fim de um ano são os sistemas que apresentam o eixo vertical.

Os sistemas de seguimento solar consistem em programas que fazem a análise da radiação incidente, ajustando a posição dos módulos para que a radiação incida na perpendicular destes, tendo como objectivo maximizar a energia convertida nas células solares fotovoltaicas. Os programas fazem a leitura da radiação utilizando sensores junto ao módulos, e fazem actuar os motores, instalados nos eixos para que estes ajustem a posição dos módulos à incidência da radiação. Vários estudos têm sido realizados sobre programas que se adequam a este funcionamento. O estudo realizado por Batayneh et al. (2013) utilizou a lógica *fuzzy* para o sistema de seguimento. Pelo facto da lógica *fuzzy* admitir a interacção de múltiplas entradas e múltiplas saídas, permite controlar vários motores em simultâneo. Os resultados obtidos a partir de ensaios de modelo em experiencias realizadas demonstraram a eficácia da operação dos sistemas que utilizam a lógica *fuzzy*.

Têm sido realizados estudos referentes à procura do ponto de potência máxima (MPP), de modo a aumentar o desempenho dos inversores utilizados nas aplicações fotovoltaicas. A técnica apresentada por Deixando et al. (2012) consiste em estabilizar a tensão (V) com o controlo da corrente (I) de entrada no inversor, segundo os algoritmos utilizados em programas como o PSIM, MATLAB/ Simulink. Os rápidos níveis de procura das simulações permitem controlar os níveis de tensão de entrada do inversor, consentindo que este apresente um bom desempenho. Também Ghani et al. (2013) utilizam algoritmos em MATLAB / Simulink incorporados no próprio inversor, que permitem gerar PWM que controla os IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) e estes dão forma adequada à energia de saída do inversor. Os resultados obtidos sobre os algoritmos desenvolvidos em MATLAB/ Simulink apresentaram-se satisfatórios, visto a energia da saída do inversor apresentar-se dentro dos parâmetros exigidos pela rede.

Com o aumento da importância dos sistemas de aproveitamento da energia solar, têm vindo a ser estudados e caracterizados os níveis da radiação na superfície terrestre. Estudos como os de Huld et al. (2012) e Bojanowski et al. (2013) têm como objectivo melhorar a base de dados referentes à radiação na superfície terrestre europeia. A obtenção de resultados da radiação mais precisos permite melhorar o desempenho dos simuladores fotovoltaicos, visto que estes são um elemento chave no desenvolvimento destas aplicações. Trata-se de uma aplicação web que calcula a radiação solar com base em imagem de satélite, apresentando-se rápida e viável. Apresenta boa precisão nos resultados obtidos com erros que não ultrapassaram os 5% da radiação real. Estes resultados pretendem melhorar os resultados presentes nas bases de dados referentes à radiação solar. As bases metrológicas não apenas permitem obter resultados mais precisos para estimar a radiação solar, como também permitem obter outras informações climatéricas, tais como a temperatura do ar, a humidade relativa e o vento, como refere Korachagaon & Bapat (2012). No entanto, dado o seu custo de implementação, são desenvolvidos modelos matemáticos para zonas onde estas não são instaladas. Os resultados obtidos nestes modelos não se mostraram tão precisos como os obtidos em satélite, por isso, revela-se mais vantajoso a utilização de estudos segundo a análise de satélites para zonas onde não existem estações metrológicas, visto os resultados serem mais precisos.

O mercado da tecnologia fotovoltaica tem merecido muita atenção, vários estudos têm sido realizados acerca da evolução deste mercado, bem como as tendências futuras para o mesmo. Estudos como Tyagi et al. (2013) têm verificado a importância da aplicação das tecnologias solares. Estes estudos têm verificado que as tecnologias têm evoluído muito rapidamente nos últimos anos, e que já desempenham um papel muito importante na produção de electricidade. A indústria da tecnologia fotovoltaica é uma das indústrias que mais tem crescido nestes anos, apresentando taxas de crescimento que estão entre os 35 a 40%. Com esse crescimento também as células de silício cristalino tem melhorado, em 1950 apresentavam 15% de eficiência, actualmente já chegam aos 28%, graças a toda a investigação e esforço na sua implementação por parte de vários países.

Segundo Singh (2012) os preços da energia produzida pela tecnologia fotovoltaica ainda não conseguem competir directamente com os preços da energia proveniente de derivados fósseis. No entanto, segundo os estudos da evolução da tecnologia e tendo em conta a redução do custo resultante da produção em massa, este mercado pode vir a competir, em pouco tempo, directamente com os seus principais concorrentes. Cabe às políticas implementadas nos países a responsabilidade da aposta nesta tecnologia, para que esta possa superar as suas barreiras.

1.3 Motivação e objectivos

As energias renováveis apresentam-se com um grande potencial para o futuro, dado que representam uma solução de elevada sustentabilidade. A aposta que se tem sentido por parte de vários países, bem como os seus objectivos e metas futuras, na implementação de fontes de energia renovável, levou a que esta torne um dos importantes motores da economia mundial, apresentando a mudança do paradigma energético.

Como o conceito dos sistemas de microprodução surgiu há poucos anos em Portugal, apresenta-se um mercado em constante evolução e em forte crescimento. A microprodução abrange os sistemas de produção de energia renovável em pequena escala. Quanto a microprodução a fotovoltaica é a que tem obtido mais interesse por parte dos investidores, embora seja a tecnologia que mais depende de apoios para obter viabilidade económica. O futuro deste mercado está dependente do desenvolvimento e da investigação associada a esta tecnologia, para alcançar preços que possam competir com as fontes convencionais de energia.

O estudo realizado no âmbito desta dissertação tem como objectivo principal fazer a análise do desempenho de unidades fotovoltaicas de microprodução em pleno funcionamento, através da análise dos resultados da produção de energia destes sistemas. Pretende-se, com base em informações reais recolhidas em unidades existentes, destetar problemas associados, e propor soluções para a melhoria de futuros projectos de unidades fotovoltaicas de microprodução, ajudando no desenvolvimento sustentado deste mercado. Para melhor compreender o funcionamento das unidades fotovoltaicas de microprodução é descrito o seu funcionamento bem como são caracterizados os elementos que a constituem. É feita uma abordagem à legislação referente às unidades fotovoltaicas de microprodução, permitindo compreender melhor este mercado e incentivar a implementação desta tecnologia.

1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação é constituída por cinco capítulos, tendo como tema principal a análise de unidades fotovoltaicas de microprodução.

O primeiro capítulo faz a introdução às unidades fotovoltaicas de microprodução, abordando a motivação e os objectivos do âmbito do desenvolvimento desta dissertação.

O segundo capítulo faz uma abordagem à importância das energias renováveis, enquadrando a microprodução fotovoltaica, assim como a legislação associada a esta.

O terceiro capítulo descreve e caracteriza os componentes utilizados nas unidades fotovoltaicas de microprodução e os factores que afectam o seu normal funcionamento. Faz uma abordagem dos procedimentos referentes ao planeamento, dimensionamento, implementação e manutenção das unidades fotovoltaicas de microprodução.

O quarto capítulo faz a descrição e caracterização das unidades fotovoltaicas de microprodução analisadas. Apresentam-se os dados da produção de energia nessas unidades e procede-se à sua análise e discussão. No quinto capítulo são apresentadas as conclusões e as recomendações para futuras aplicações de unidades fotovoltaicas de microprodução.

Capítulo 2

2 A microprodução fotovoltaica em Portugal

Este capítulo tem como objectivo contextualizar o tema da microprodução fotovoltaica, começando por fazer uma abordagem às energias renováveis, nomeadamente à energia solar. Posteriormente é abordado o tema referente à energia fotovoltaica, bem como às suas vantagens. Por último, faz uma abordagem à legislação associada à microprodução fotovoltaica.

2.1 Energias renováveis

Devido à grande evolução do século XX, o século XXI terá agora de olhar para alguns dos efeitos indesejados dessa evolução, criando soluções que promovam um paradigma evolutivo mais sustentável. Um desses efeitos mais indesejados é a emissão de gases poluentes para a atmosfera, que contribuem para o aquecimento do planeta. Actualmente, os seus efeitos nefastos começam a ser bem visíveis. As grandes alterações que se fazem sentir surgem devido à utilização massiva de matérias-primas na produção de energia que produzem grande quantidade de gases poluentes, como é o caso do CO₂.

A produção de energia eléctrica é das principais responsáveis pelo efeito de estufa devido à emissão desses gases. No entanto, é a que se tem adaptado mais rapidamente a nova realidade. A produção de energia recorrendo a recursos renováveis disponibilizados pela Terra (como o vento, o sol, os rios e os mares) são os principais meios alternativos para a produção de energia eléctrica, permitindo assim a diminuição da emissão de gases de efeito de estufa. Desta forma, contribuem decisivamente para a mudança do panorama actual deste tipo de energia. É deste esforço que vêm surgindo as tecnologias de aproveitamento das energias renováveis. Os sistemas hidroeléctricos, que aproveitam o caudal dos rios, são já há muito utilizados. A energia eólica e têm sido uma das grandes apostas na última década para a geração de electricidade sem emissões gases poluentes, e continuará certamente a sua evolução. A energia fotovoltaica dá passos firmes no sentido de seguir esse caminho. Outras alternativas, como a energia das ondas dão agora os primeiros passos para o desenvolvimento da investigação associada a este recurso, como explicita Proença (2007).

As políticas dos países industrializados estão cada vez mais direccionadas para a utilização de energia proveniente de fontes de energia renovável (FER). Os Estados Unidos da América (EUA) implementaram em Agosto de 2005 a Energy Bill, que aponta para o uso mais inteligente dos recursos disponíveis e para uma aposta nos recursos endógenos. A União Europeia (UE) veio em Janeiro de 2007 assumir um objectivo de produzir a curto prazo 20% da energia que consome a partir de recursos renováveis, entre outras metas. As políticas adoptadas no Japão, como em outros países seguem a mesma tendência, como refere Proença (2007).

Comparativamente com os países membros da União Europeia, Portugal tem um enorme potencial no que respeita às energias renováveis, visto que apresenta condições privilegiadas para isso: uma rede hidrográfica relativamente densa, uma elevada exposição solar média anual e uma vasta costa marítima. No entanto, só nos últimos anos Portugal tem apresentado um significativo crescimento na utilização das FER. Tal deve-se, em parte, ao objectivo de reduzir a elevada dependência energética do país e, adicionalmente, devido aos compromissos estabelecidas com a UE no que respeita ao aumento da quota das energias renováveis na matriz energética europeia e à diminuição das emissões de CO₂, estabelecidas na Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Abril de 2009.

Para ir ao encontro desses objectivos o Governo Português tem adoptado várias medidas. A microprodução é um claro exemplo dessa aposta, com a implementação do Decreto-lei nº 363/2007, bem como as sucessivas alterações, que vêm simplificar e apoiar a energia produzida por FER num modelo produtor/consumidor. Com esta aposta, Portugal pretende diminuir a dependência energética do exterior, aumentar a eficiência energética e promover a instalação de fontes de energia renováveis. As metas estabelecidas para a microprodução têm vindo a ser alcançadas, visto que consecutivamente têm sido instaladas as potências disponibilizadas pelo estado para o regime bonificado, como se verifica nos dados apresentados na página da Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG), demonstrando por parte dos investidores um grande interesse neste mercado.

Devido à grande aposta nas FER, Portugal tem participado activamente neste movimento de mudança do paradigma energético, apresentando-se nos primeiros lugares referentes à implementação de energias renováveis. Alcançou em 2011, o terceiro país da União Europeia (UE15) com maior incorporação de energias renováveis como refere DGEG (2013). As metas alcançadas são o reflexo da grande aposta no aproveitamento da energia eólica, e, mais recentemente, da energia solar fotovoltaica onde têm apresentado o maior crescimento, como refere o mesmo documento.

A potência total instalada de FER até o final de 2012 em Portugal Continental foi de 10,583 MW, a qual resultou no mesmo ano, a produção de 19 TWh, representando cerca de 45,6% no consumo bruto de energia eléctrica. Apesar de o mercado da microprodução ser relativamente recente, de acordo com DGEG (2013), do total da energia eléctrica produzida por FER em 2012, a microprodução contribuiu com 138 MW, com uma potência instalada de 99,8 MW até ao final do mesmo ano.

O crescimento do mercado das FER está ainda hoje muito dependente de apoios. No entanto, espera-se que este mercado alcance o nível desejado de autonomia, para que possa competir directamente com as actuais fontes de energia não renováveis (convencionais), que actualmente lideram a produção de energia eléctrica, como se pode verificar na figura seguinte. Para que o mercado das FER alcance o nível de autonomia desejado, ter-se-á que continuar a desenvolver a investigação, aumentar a produção e a implementação das mesmas, de modo a alcançar a redução dos preços associados à implementação destas tecnologias como refere Roriz (2010).

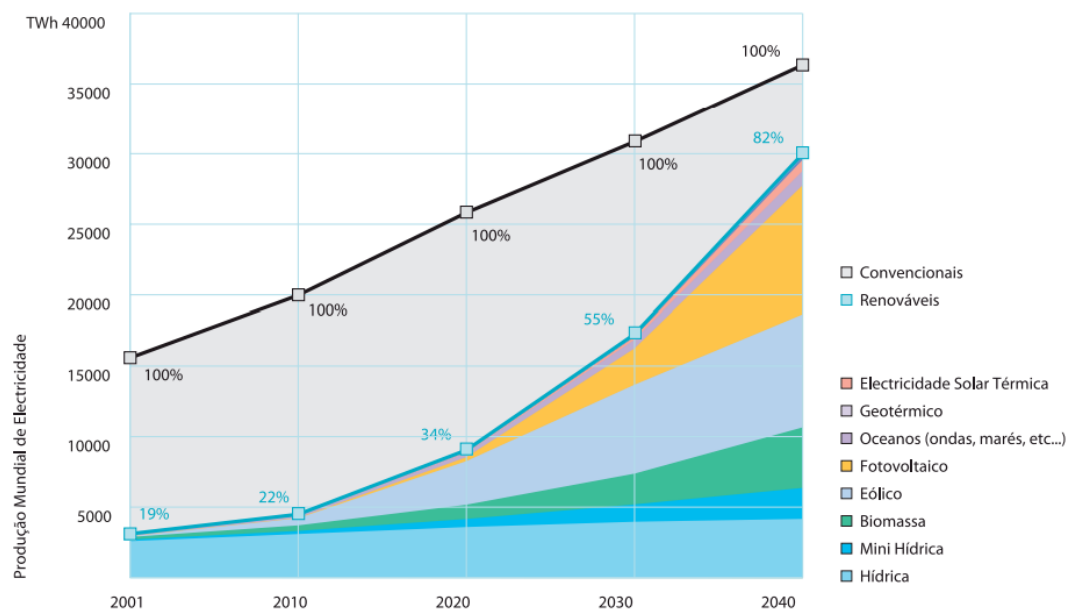


Figura nº 2.1: Perspectiva de evolução da produção mundial de energia eléctrica até 2040.

(Fonte: EREC (2005))

Da observação da figura nº 2.1 perspectiva-se um significativo crescimento das FER nas próximas décadas. Entre as diversas fontes de energia renovável espera-se que a energia fotovoltaica apresente o crescimento mais acentuado, o que já se têm vindo a verificar recentemente, como se pode averiguar nos dados apresentados na página da DGEG (2013). Apesar da boa perspectiva de crescimento da energia fotovoltaica a sua implementação definitiva depende ainda de factores como a evolução do preço da tecnologia fotovoltaica e da tomada de decisões políticas nesse sentido.

2.2 Energia solar

Como refere Morais (2009), *“A origem da vida e das outras formas de energia que existem na terra têm como principal fonte energética, o sol”*. Segundo o mesmo autor, desde há milhões de anos o sol irradia para o espaço luz e calor, chegando a alcançar, em cada segundo, a emissão de $38 \cdot 10^{25}$ J, da qual, somente uma infinitésima parte chega à superfície da terra.

A luz solar é uma fonte de energia proveniente do sol, acessível em todo o mundo com diferentes intensidades e quantidades. A luz é uma radiação visível composta por um campo eléctrico e um campo magnético a qual caracteriza a energia dos fotões que constituem a radiação visível. A superfície da terra recebe anualmente $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh de energia proveniente do sol, que daria para sustentar o consumo mundial durante 10.000 anos!

Nas últimas décadas, o consumo de energia tem crescido acentuadamente no mundo, por um lado devido à evolução da sociedade, por outro devido ao crescimento das economias emergentes, como a China. Com o aumento das necessidades surgem soluções energéticas mais eficientes e sustentáveis, tanto na sua geração, conversão, fornecimento e utilização. A exploração das energia renováveis, nomeadamente a exploração da energia solar surge como uma alternativa para a produção de energia eléctrica, recorrendo à tecnologia fotovoltaica, permitindo satisfazer parte das necessidades.

A energia solar fotovoltaica está actualmente a afirmar o seu potencial de desenvolvimento e inovação, procurando-se desenvolver técnicas e ferramentas que a tornem, não só mais económica, mas mais eficiente. Adicionalmente, procura-se aumentar o leque de aplicações, para que sejam alcançadas condições de competitividade no mercado das energias.

A radiação incidente na atmosfera apresenta-se em maior quantidade que a incidente na superfície terrestre, isto deve-se à absorção, à reflexão e à dispersão das diferentes camadas constituintes da atmosfera terrestre. *“O nível de irradiação na Terra atinge aproximadamente 1.000 W/m^2 ao meio-dia, em boas condições climatéricas”* como refere GREENPRO (2004), p. 2.8. Por este motivo este valor é adoptado nos ensaios padrão dos módulos, e apresenta-se na folha técnica dos mesmos. A radiação incidente na superfície terrestre é constituída por uma fracção difusa e uma fracção directa. A radiação directa é a radiação que atinge directamente a superfície da terra, e é caracterizada por possuir mais quantidade de energia. A radiação difusa é a radiação dispersa pela atmosfera.

Fruto das suas características geográficas Portugal tem condições preferenciais para o aproveitamento de recurso solar quando comparado com uma parte significativa dos restantes países constituintes da UE. Portugal continental apresenta entre 2200 a 3000 horas de sol por ano com uma radiação média anual entre 1.300 a 1.800kWh/m², como se observa em GREENPRO (2004). Apesar de ser no sul de Portugal onde se apresentam as melhores condições para o aproveitamento do recurso solar, a região norte apresenta, também, óptimas condições quando comparada com países como a Alemanha, Bélgica, França, etc..

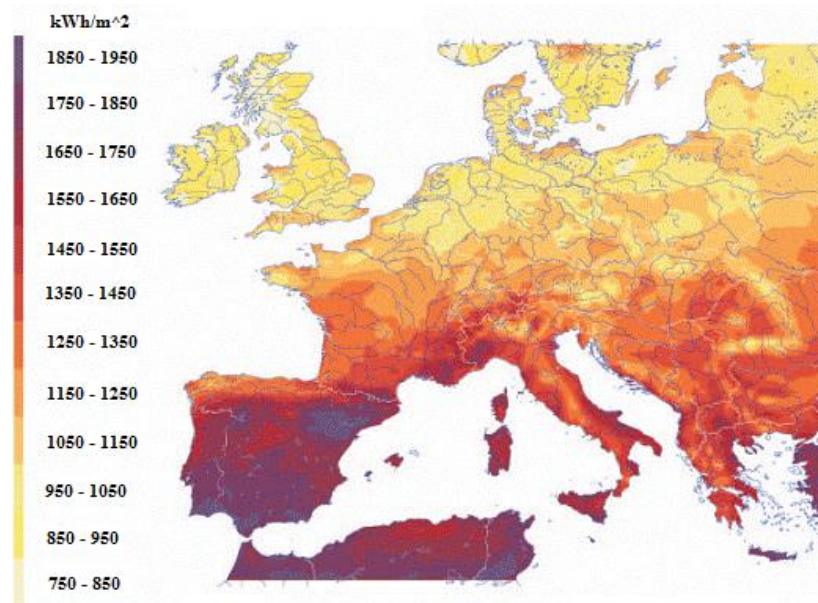


Figura nº 2.2: Irradiação na Europa. (Fonte: Portal das energias renováveis)

A intensidade da radiação incidente varia consoante a distância e o ângulo solar, que resultam do movimento de translação e rotação da terra. A variação da radiação é quantificada no parâmetro de Massa de Ar (AM). No caso de Portugal a radiação alcança o valor máximo no Solstício do Verão (que ocorre a 21 de Junho) e o valor mínimo no Solstício Inverno (que ocorre 21 de Dezembro) como refere GREENPRO (2004).

O parâmetro de Massa de Ar (AM) está relacionado com o percurso efectuado pela radiação na atmosfera até atingir a superfície terrestre, em que, quanto maior é essa distância, maior é o parâmetro de Massa de Ar, originando mais perdas da radiação na atmosfera. Os locais que obtêm a maior energia incidente são os locais onde a radiação percorre o menor deslocamento, nomeadamente na zona tropical, em que o parâmetro AM igual a 1. Como refere GREENPRO (2004), a média da Europa do parâmetro AM é de 1,5, motivo pela qual este valor é adoptado nos ensaios padrão dos módulos, presentando-se nas folhas técnicas dos mesmos. O parâmetro AM é adido por:

$$AM = \frac{1}{\sin \gamma_s} \quad (2.1)$$

A Posição do Sol (γ_s) descreve a altura solar, é o ângulo da radiação com a superfície terrestre.

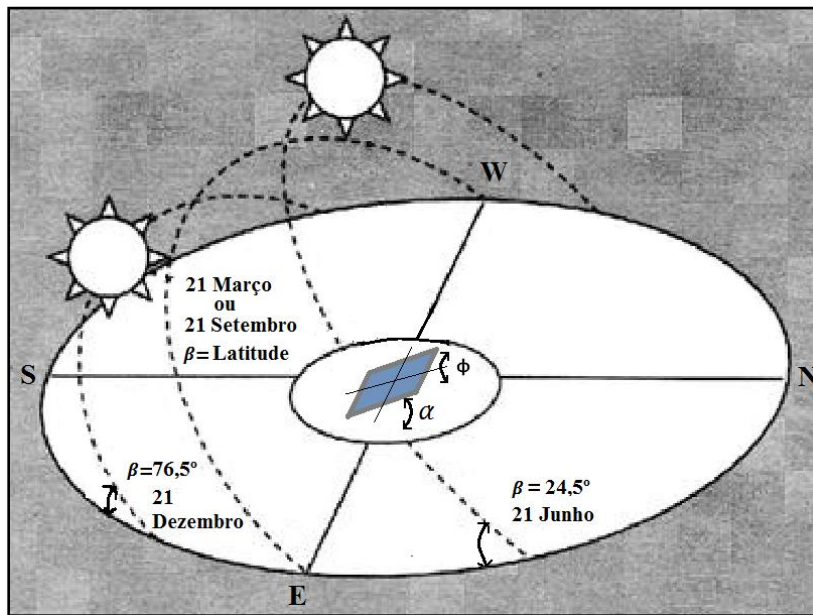


Figura nº 2.3: Percurso solar para Portugal continental.

Como a da intensidade da radiação incidente varia com a época do ano, segundo a GTES (2004) os módulos fixos que pretendam maximizar a geração de energia num ano de verão ser direccionados para o Equador com uma inclinação de cerca de 10° em torno da latitude do local onde o sistema é instalado. Pelo facto de Portugal continental se apresentar na zona temperada, com latitude entre 37° e 42° , como se pode verificar na figura n.º 3, para que as instalações obtenham a maior conversão de energia ao longo dum ano, os painéis devem ser orientados para o sul geográfico, azimute igual a zero graus $\phi=0^\circ$, com uma inclinação próxima dos trinta e cinco graus $\alpha=35^\circ$ face ao plano horizontal terrestre, GREENPRO (2004). A instalação de acordo com estes parâmetros permite que a radiação incida na perpendicular da superfície dos módulos num período mais longo, permitindo assim converter maior quantidade de energia num ano. No entanto existem por vezes alguns factores que motivam a que a instalação dos módulos ocorra com um ângulo diferente da ideal, como sejam, factores associados ao sobriamente do gerador, devido ao investimento necessário para a rectificação a orientação e inclinação do gerador, devido as exigências da área disponível para a instalação dos módulos.



Figura nº 2.4: Localização geográfica de Portugal. (Fonte: Greenpeace (2006))

Para aumentar a conversão de energia dos painéis fotovoltaicos, estes podem ser dotados de sistemas que acompanham a direcção do sol. Pelo facto da posição solar variar ao longo do dia e do ano, devido ao movimento de rotação e de translação da Terra, para os módulos fotovoltaicos acompanharem a direcção do sol, estes tem ser dotados de dois eixos de rotação. A incorporação do eixo orientação (ou Azimute) Φ e a eixo de inclinação α permite que os módulos captem a radiação nas melhores condições de incidência, permitindo maximizar a geração de energia ao longo de todo o ano. Os sistemas com dois eixos permitem que a radiação incida na perpendicular da superfície dos módulos ao longo de todo o período de funcionamento, permitindo assim converter a máxima quantidade de energia. *“Em dias sem nuvens, estes ganhos podem atingir 50 % no Verão e 300 % no Inverno, quando comparados com os ganhos de sistemas fotovoltaicos com uma área de captação horizontal”*. *“Quando comparando com os sistemas fotovoltaicos com uma área de captação inclinada podem obter um aumento de produção de 30 % nos dispositivos de dois eixos, e o ganho situa-se nos 20 % nos dispositivos de um eixo”* como se observa em GREENPRO (2004). No entanto estes dispositivos necessitam de maior investimento e maior manutenção. Os sistemas que apresentam um só eixo apresentam menor conversão de energia, mas trata-se de sistemas com um menor investimento.

2.3 A energia solar fotovoltaica

O efeito fotovoltaico foi descoberto em 1839 por Edmund Becquerel, quando este se apercebeu que ao expor um material semiconductor à luz solar, surgia nos extremos deste uma diferença de potencial. As grandes melhorias da eficiência na conversão da energia resultantes dos avanços de Albert Einstein, da mecânica quântica, física dos semicondutores, assim como as técnicas de purificação e dopagem associadas ao desenvolvimento do transistor de silício, permitiram em 1956 a iniciação da produção industrial com o objectivo de satisfazer necessidades energéticas em aplicações de telecomunicações.

O desenvolvimento na área das telecomunicações surgiu com a necessidade de alimentar componentes eléctricos em zonas remotas. Como refere GTES (2004) o segundo agente impulsionador foi o sector espacial, visto que as células solares apresentavam-se como o meio mais adequado para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de permanência no espaço com o menor custo e peso.

Posteriormente, a crise energética de 1973 alertou as sociedades para a dependência dos recursos endógenos, despertando o interesse pela tecnologia fotovoltaica para aplicações terrestres. No entanto, a aplicação desta tecnologia apresentava-se ainda muito dispendiosa para o interesse dos investidores, sendo necessário reduzir os preços dos processos para tornar as aplicações economicamente viáveis. Surgiu assim, por parte da indústria, o interesse no estudo de materiais alternativos, de novos processos e de novas aplicações que permitissem reduzir o custo das aplicações das células fotovoltaicas.

O sol é uma fonte de energia “inesgotável” que pode ser aproveitada tanto como fonte de calor como fonte de luz. É hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentar os desafios do futuro. No entanto, o mercado de aproveitamento deste recurso natural ainda se apresenta em desenvolvimento.

O custo das células solares é, ainda hoje, um grande desafio para a indústria. Apesar disso, a tecnologia fotovoltaica está a tornar-se cada vez mais competitiva, não só pela redução do custo de implementação (devido ao aumento das aplicações por parte de vários países) como também por causa do aumento do custo associado às fontes de energia convencionais, como é o caso dos derivados do petróleo.

A grande aposta na energia fotovoltaica tem consistido no desenvolvimento de técnicas, acessórios e equipamentos que permitiram já melhorar de forma significativa a eficiência e a vida útil das células e módulos fotovoltaicas. Os fabricantes conseguem actualmente garantir eficiências de cerca de 18% nos módulos, em aplicações comerciais, e períodos de vida dos seus equipamentos até 25 anos, ou mais.

A análise das características da energia fotovoltaica permite perceber que esta será uma fonte de energia adequada para suprir as cargas de pico da rede durante o dia. Assim sendo, *“as fontes de energia com que compete são aquelas que asseguram o abastecimento nessas mesmas horas”*, como refere GTES (2004).

No caso da produção de energia fotovoltaica, este tipo de energia tem tido uma grande aposta por parte de vários países, o que tem permitido o aumento da eficiência e a redução acentuada dos custos dos equipamentos, o que, por conseguinte, levou a que esta possa atingir dentro de pouco tempo um custo que lhe permitirá competir com as principais fontes de energia da rede. A partir desse ponto, a energia fotovoltaica poderá competir directamente com as outras formas de produção sem apoios por parte dos estados, existindo a expectativa que tal conduza à abertura de um mercado de grande dimensão, como refere Proença (2007). Apesar da produção fotovoltaica poder representar um grande contributo na produção de energia eléctrica, esta não poderá ser uma solução única, mas apenas mais uma fonte energética que vem contribuir para o conjunto de soluções que devem assegurar o abastecimento de energia eléctrica na rede de distribuição.

A tecnologia fotovoltaica actualmente existente pode ser dividida em três subcategorias, que surgiram com o seu desenvolvimento. As células de primeira geração, feitas a partir de silício cristalino, que englobam as soluções monocristalinas e policristalinas. A segunda geração corresponde às soluções de película fina, onde novos materiais semicondutores são explorados. As células de terceira geração, por sua vez, englobam novos conceitos de células solares, na sua maioria ainda apenas na fase de desenvolvimento, com combinações de soluções microcristalinas, nanocristalinas ou híbridas, por exemplos, como refere Proença (2007).

2.4 Microprodução fotovoltaica

2.4.1 Objectivo da introdução da microprodução em Portugal

A microprodução é uma actividade de geração de energia eléctrica, por intermédio de instalações de fontes renováveis com baixa potência e baixa tensão (BT), sendo que a potência por unidade instalada pode ir até 5,75kW, no caso de microprodutores particulares, e até 11,04 kW, no caso de condomínios. Este género de actividade caracteriza-se por ser descentralizada e ser instalado perto da área de consumo, em que a energia produzida é injectada directamente na rede pública. Este mercado está actualmente regulamentado pelo Decreto-Lei n.º 25/2013. A introdução da actividade de microprodução em Portugal surgiu com o Decreto-Lei n.º 363/2007, com o objectivo de cumprir as metas estabelecidas pelos diferentes acordos ambientais e energéticos com União Europeia.

A incorporação das energias renováveis em Portugal vêm permitir ao país:

- Reduzir a dependência energética do país face ao exterior através do aumento da produção de energia a partir de recursos endógenos;
- Ajudar ao cumprimento dos compromissos assumidos por Portugal no contexto das políticas europeias de combate às alterações climáticas;
- Reduzir o saldo importador energético com a energia produzida a partir de fontes endógenas;
- Criar riqueza e crescimento industrial;
- Consolidar o quadro energético no sector das energias renováveis;
- Promoção da eficiência energética.

A União Europeia comprometeu-se até 2020 a reduzir em 20% as emissões de gases de efeito de estufa (GEE), aumentar a eficiência energética em 20%, e aumentar na mesma percentagem o consumo de energia renováveis, tendo como referência os valores obtidos em 1990. Estas metas podem ser consultadas no documento European Commission (2008a).

Para tornar acessível o mercado da microprodução foi necessário proceder a um vasto conjunto de políticas, medidas, apoios fiscais, facilitar o acesso ao crédito e simplificar os procedimentos legislativos para tornar este mercado atractivo. No entanto medidas como a divulgação do regime da microprodução, a consciencialização da sociedade relativamente aos benefícios para o meio ambiente e a consciencialização do valor acrescentado para a suas próprias habitações com a implementação de um sistema de microprodução são, também, importantes para aumentar a confiança dos investidores.

2.4.2 Vantagens e desvantagens da microprodução (enquanto forma de produção descentralizada)

As vantagens associadas à implementação de sistemas de microprodução podem ser divididas em mais que um grupo:

Relativamente ao ambiente:

- A produção de energia eléctrica recorrendo a fontes de energia renovável permite, não só, melhorar o desempenho ambiental dos sistemas de produção de energia, como também a redução das emissões de gases com efeito de estufa.
- Sensibilização dos consumidores para o tema da energia, permitindo que estes participem directamente na protecção do ambiente, com a implementação de unidades de microprodução;

Relativamente ao sistema eléctrico de distribuição:

- A implementação da microprodução perto dos locais de consumo permite adiar investimentos pesados no reforço das infra-estruturas da rede e reduzir as perdas de energia na rede de distribuição eléctrica;
- Com a produção perto do consumidor reduz-se a probabilidade de ocorrerem apagões, aumentando a fiabilidade no fornecimento de electricidade e a qualidade do serviço;

Relativamente ao mercado:

- Aumento da autonomia e poder de decisão dos consumidores individuais e das comunidades locais no processo de produção de energia;
- Aparecimento de um novo mercado, com novos serviços, com impacto importante na criação de emprego e no crescimento económico;
- Oportunidade para a indústria portuguesa de equipamentos, componentes e serviços do sector eléctrico expandir o seu mercado;
- Contribuição para a alteração da forte dependência do sistema energético português relativamente ao exterior, permitindo que o mercado fique menos exposto às oscilações do preço da energia;
- Desenvolvimento tecnológico;

Tal como no caso das vantagens, também as desvantagens associadas à implementação dos sistemas de microprodução podem ser divididas em grupos:

Relativamente aos custos de produção:

- Maior investimento por energia produzida, comparativamente com instalações de maior potência, aumentando o tempo de amortização do investimento;
- Necessidade de uma política de incentivos e benefícios fiscais para dinamizar este mercado, pelo menos até a tecnologia poder competir com as formas convencionais de produção de energia eléctrica;

Relativamente às dificuldades técnicas:

- Maior custo associado à manutenção, devido à necessidade de um número maior de operadores para proceder à manutenção nas diferentes regiões;
- Necessidade de um protocolo e infra-estruturas de comunicação mais robusto, devido ao maior número de produtores;

2.4.3 Legislação associada à microprodução

O mercado da microprodução é relativamente recente, por isso tem vindo a sofrer algumas alterações, e actualmente é regulado pelos Decreto-Lei n.º 25/2013 de 19 de Fevereiro. As sucessivas alterações têm vindo a ser tomadas com o objectivo de complementar, ajustar e simplificar o primeiro Decreto-Lei n.º 363/2007 que introduziu a microprodução no nosso país.

A microprodução estabelece dois regimes com diferentes exigências para a sua aplicação: o regime geral e o regime bonificado. O regime geral caracteriza-se por poder ir até uma potência de 5,75 kW. Neste regime a remuneração é acordado pelo produtor e pelo comprador. São inseridos neste regime os sistemas de microprodução que não cumprem os requisitos do regime bonificado. O regime bonificado caracteriza-se por poder ir até a uma potência de 3,68 kW, ou 11,04 kW no caso dos condomínios. O produtor é remunerado com base na tecnologia implementada e com base na tarifa de referência que vigorar à data da emissão do certificado de exploração. A tarifa é aplicável durante um total de 15 anos contados desde o primeiro dia do mês seguinte ao do início do fornecimento, subdivididos em dois períodos: o primeiro com a duração de 8 anos e o segundo com a duração dos subsequentes 7 anos. O produtor pode, se o desejar, optar pelo regime geral, em qualquer momento.

A remuneração de energia produzida na unidade de microprodução é referida com base na tarifa de referência em vigor na data de emissão do certificado de exploração. Mediante a tecnologia utilizada na produção de energia eléctrica, a tarifa de referência é aplicada com a seguinte percentagem por tecnologia:

- a) Solar – 100 %;
- b) Eólica – 80 %;
- c) Hídrica – 40 %;
- d) Co-geração a biomassa – 70 %;
- e) Pilhas de combustível com base em hidrogénio proveniente de microprodução renovável – percentagem prevista nas alíneas anteriores aplicável ao tipo de energia renovável utilizado para a produção do hidrogénio;
- f) Co-geração não renovável – 40 %.

Os requisitos necessários para aderir ao regime bonificado, segundo o Decreto-Lei n.º 25/2013 de 19 de Fevereiro são:

- A potência máxima de saída do inversor não pode ser superior a 3,68kW por unidade de microprodução (no caso dos condomínios o valor máximo é 11,04 kW);
- Os produtores não podem injectar uma potência superior a 50% da potência contratada;
- A unidade de microprodução deve ser instalada no local do consumo, ou seja, onde é efectuada a compra de energia a rede de distribuição;
- O local de consumo tem que dispor de uma das seguintes alternativas: colector solar térmico com uma área útil superior a 2 m² ou caldeira a biomassa com produção anual de energia térmica equivalente. (No caso dos condomínios, existe a obrigatoriedade da aplicação de medidas de eficiência energética identificadas em auditoria);
- O somatório da potência das unidades de microprodução ligadas a um posto de transformação não devem ser superiores em 25% do somatório da potência total ligada a esse mesmo posto;
- Não pode ser ultrapassada a cota anual de potência estabelecida para a microprodução (em 2013 essa cota é de 11 MW).

As vantagens do regime bonificado:

- O contrato de remuneração é assegurado para um período total de 15 anos;
- Benefícios na remuneração da energia produzida;

Desvantagens do regime bonificado:

- Tem que se cumprir com vários requisitos impostos para aderir ao regime bonificado;
- No caso de desemprego, pode perder benefícios no acesso à remuneração de desemprego;

2.4.4 Procedimento para ser microprodutor

Nos procedimentos para ser microprodutor são abordados alguns procedimentos necessários para um microprodutor, no entanto estes passos não devem ser entendidos como um guia para quer ser microprodutor. Este tópico tem como objectivo familiarizar o leitor de procedimentos que serão necessários para tornar um microprodutor. Os procedimentos referidos estão de acordo com o Decreto-Lei n.º 25/2013.

- 1) Fazer o pré-registo electrónico no portal das SRM;
- 2) Consoante a quota de potência de ligação disponibilizada para o ano corrente pode ser aceite atribuindo potência de ligação;
- 3) É instalada a unidade de microprodução;
- 4) É emitido o respectivo certificado de exploração, disponibilizado pela SRM;
- 5) Proceder a instalação da unidade de microprodução;
- 6) O pedido de inspecção tem que ser realizado na SRM, com um prazo máximo de quatro meses da data de registo;

- 7) A data da inspecção é realizada no prazo de dez dias do pedido, sendo comunicado ao proprietário e ao técnico responsável a hora e o dia pela SRM;
- 8) É verificada se a unidade de microprodução apresenta-se de acordo com o decreto-lei em vigor, é verificada a correcta instalação e certificação dos equipamentos e são efectuados ensaios necessários para verificar o adequado funcionamento;
- 9) Na inspecção deve estar presente o técnico responsável pelas instalações eléctricas, ao qual compete esclarecer todas as dúvidas que possam ser suscitadas no acto da inspecção;
- 10) Concluída a inspecção, o inspector entrega ao técnico responsável cópia do relatório da inspecção e suas conclusões, registando-os no SRM.
- 11) Se caso a unidade de microprodução apresentar-se em conformidade é emitido o certificado de inspecção;
- 12) Se caso o relatório da inspecção concluir a existência de deficiências que não permitam a emissão do certificado, o produtor deve proceder no sentido de colmatar as deficiências indicadas, tendo um período máximo de 30 dias para proceder a um novo pedido de inspecção;
- 13) No prazo de 10 dias após a emissão do certificado de exploração, o produtor adere ao contrato de comercialização cuja minuta deve estar disponibilizada no sítio da Internet do comercializador de último recurso;
- 14) O comercializador de último recurso é avisado, através do SRM, da emissão do certificado de exploração, com vista à celebração do contrato de compra e venda de electricidade;
- 15) No prazo de 10 dias após a adesão do produtor ao contrato de compra e venda de electricidade, o comercializador de último recurso avisa o operador da rede de distribuição para proceder à ligação da unidade de microprodução à RESP, dando conhecimento ao SRM;
- 16) O operador da rede de distribuição deve proceder à ligação da unidade de microprodução no prazo de 10 dias após a recepção dos avisos do comercializador de último recurso ou do SRM;
- 17) A data de ligação à rede pública deve ser actualizada no SRM pelo operador da rede de distribuição.

O incumprimento de algum item pode implicar a anulação da inscrição do sistema de microprodução no sistema de registo de microprodução.

2.4.5 Evolução da microprodução fotovoltaica em Portugal para o regime bonificado

Para perceber a evolução das unidades fotovoltaicas em Portugal para o regime bonificado, apresenta-se na tabela seguinte os dados desse evolução.

Com as alterações que o Decreto-Lei nº 118-A/2010 introduzido sobre o Decreto-Lei nº 363/2007, foram alterados os anos de remuneração, mantendo o período total 15 anos do regime bonificado. O primeiro período passa de 5 para 8 anos e o segundo período passa de 10 para 7 anos.

Tabela nº 2.1: Evolução da microprodução fotovoltaica para o regime bonificado entre 2008 e 2009.
(Fonte: SRM (1 de Outubro, 2013))

Ano	2008/2009
Potência atribuída (MW)	10
Potencia ligada a rede (MW)	35,4
Unidades ligadas a rede	9982
Tarifa para os primeiros 5 anos (€)	0,65(-5% por cada 10MW instalado)
Tarifa para os seguintes 10 anos (€)	Tarifa aplicada a primeira U.F.M. do ano em vigor

Tabela nº 2.2 Evolução da microprodução fotovoltaica para o regime bonificado entre 2010 e 2013.
(Fonte: SRM (1 de Outubro, 2013))

Ano	2010	2011	2012	2013
Potência atribuída (MW)	25	29,6	12,4	11
Potencia ligada a rede (MW)	7,88	27,1	11,5	4,80
Unidades ligadas a rede	2213	7586	3214	1350
Tarifa para os primeiros 8 anos (€)	0,40	0,38	0,326	0,196
Tarifa para os seguintes 7 anos (€)	0,24	0,22	0,185	0,165

Como se verifica na tabela nº 2.8 a potência atribuída tem vindo a decrescer ao longo dos anos, juntamente com o número de unidades ligadas a rede e da potência ligada. Verifica-se que a tarifa sofreu um decréscimo entre 2008 e 2013 de 300%. Apesar de a tarifa ter diminuído também verifica a diminuição do investimento necessário para unidades fotovoltaicas.

O Decreto-Lei n.º 118-A/2010 veio alterar o número de anos da atribuição da tarifa para os dois períodos do regime bonificado, no primeiro período passou de 5 para 8 anos, e no segundo passou de 10 para 7 anos. Verifica-se também com este Decreto-Lei que a tarifa para os dois períodos é conhecida consoante o período de atribuição de potência a unidade fotovoltaica.

Tabela nº 2.3: Evolução histórica da produção de energia eléctrica por via fotovoltaica em Portugal Continental
(Fonte: DGEG, (Julho, 2013))

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Unidades fotovoltaicas (GWh)	4	4	21	41	160	213	265	360
Microprodução (GWh)							75	138

Como refere a DGEG (Julho, 2013) a totalidade da energia produzida por intermédio de fontes de energia renovável no ano 2012, em Portugal Continental, foi de 19,821 TWh, a microprodução fotovoltaica contribui com 138 GWh da potência total instalada de 99,8 MW. A energia fotovoltaica é a que obteve a maior Taxa de Crescimento Média Anual em Portugal entre 2005 e 2012, representando um crescimento de 86,3%. Também foi a fotovoltaica que obteve o maior licenciamento das fontes de energia renovável, do final de 2011 para 2012, passando de 139 MW para 250 MW, correspondendo a um aumento de 55,6%, como refere a DGEG (Julho, 2013). É de denotar que actualmente a capacidade fotovoltaica instalada no mundo já ultrapassa mais de 100 GW, capaz de produzir pelo menos 110 TWh de energia eléctrica ao ano, sendo a UE, responsável pela capacidade instalada de 70%, como refere EPIA (2013).

Toda está aposta nas fontes de energia renovável permitiu a Portugal em 2011 ficar nos três primeiros lugares dos países da União Europeia (UE15) com maior incorporação de energias renováveis. Portugal manteve a posição do ano anterior, apesar da produção hídrica ter caído 27%. Como refere as DGEG (Fevereiro, 2013)

Para a sustentação da implementação da tecnologia fotovoltaica espera-se que num futuro próximo esta alcance a paridade de preços com as principais fontes de energia eléctrica, tornando-se um mercado auto-sustentável, sem que esta dependa unicamente das medidas políticas, permitindo alcançar uma participação preponderante na produção deste tipo de energia. No entanto, até que sejam alcançadas estas condições, as medidas políticas terão um forte impacto no desenvolvimento deste mercado, como refere EPIA (2013).

2.5 Nota conclusiva

Na resolução deste capítulo fez-se a bordagem à importância das energias renováveis no contexto de Portugal, enquadrando-se a temática das unidades fotovoltaicas de microprodução. Também foram abordados aspectos legislativos das unidades de microprodução, referindo as suas vantagens e desvantagens na implementação desta tecnologia.

Após a introdução e o enquadramento das unidades fotovoltaicas de microprodução, no próximo capítulo serão caracterizados os equipamentos que a constituem. Abordar-se-ão, ainda, os aspectos referentes ao planeamento, dimensionamento, implementação e manutenção das unidades fotovoltaicas de microprodução

Capítulo 3

3 Aspectos técnicos de uma unidade fotovoltaica de microprodução

Após a contextualização da microprodução microprodução efectuada nos capítulos 1 e 2, na elaboração deste capítulo são caracterizados os elementos que constituem uma unidade fotovoltaica de microprodução, bem como, são abordados aspectos técnicos associados às diferentes fases de projecto, planeamento, dimensionamento, implementação e manutenção deste tipo de unidades. A elaboração deste capítulo tem como objectivo reunir os conhecimentos necessários para efectuar a implementação de uma unidade fotovoltaica de microprodução, evitando procedentes erros que possam pôr em causa o normal funcionamento dessas mesmas unidade, ou mesmo a sua viabilidade.

3.1 Elementos que constituem uma unidade fotovoltaica de microprodução

As unidades fotovoltaicas de microprodução são unidades de pequena escala para a produção de energia eléctrica recorrendo ao recurso natural e “inesgotável” que é o sol. A produção de energia eléctrica na microprodução consiste na conversão directa da radiação solar em energia eléctrica. A conversão é possível graças à utilização de materiais semicondutores que constituem as células fotovoltaicas, que na globalidade das utilizações consistem em células de silício. A energia obtida na conversão apresenta-se como corrente contínua. Devido às características particulares dessa energia resultante da conversão da radiação solar em energia eléctrica, nem sempre se pode aplicar directamente ao consumo. No caso das unidades fotovoltaicas de microprodução, a energia é injectada na sua totalidade na rede, sendo, para isso, necessário a utilização de inversores que permitem converter a corrente contínua proveniente do gerador solar em corrente alternada, de acordo com as características da energia que circula na rede de distribuição.

Apesar do grande desenvolvimento tecnológico e da evolução do rendimento das células fotovoltaicas, estas não apresentam ainda as características desejadas para fazer face à energia produzida segundo outras fontes de energia. Actualmente as células fotovoltaicas chegam a atingir um rendimento que pode chegar aos 18% no mercado.

A produção de energia eléctrica recorrendo à conversão fotovoltaica trata-se de uma energia limpa, ou seja, não poluente, pois na conversão da radiação em energia eléctrica não há emissões de CO². Na conversão da energia são utilizados componentes fixos, permitindo uma grande durabilidade dos equipamentos, a qual se pretende que chegue aos 30 anos num futuro próximo, com elevadas eficiências. A aplicação da tecnologia fotovoltaica requer um investimento inicial considerável, pelo que a crise do início do séc. XXI tem retraído as perspectivas de crescimento deste mercado.

A tecnologia fotovoltaica pode ser utilizada para gerar energia eléctrica para casos isolados ou para injectar na rede de distribuição eléctrica, exigindo a utilização de equipamentos distintos. Os equipamentos utilizados nas unidades fotovoltaicas de microprodução são os módulos, o inversor, o contador, os suportes, os elementos de protecção e os cabos, que serão analisados posteriormente. Na figura nº 3.1 apresenta-se um esquema de uma unidade fotovoltaica de microprodução, onde podemos verificar a configuração geral destas unidades.

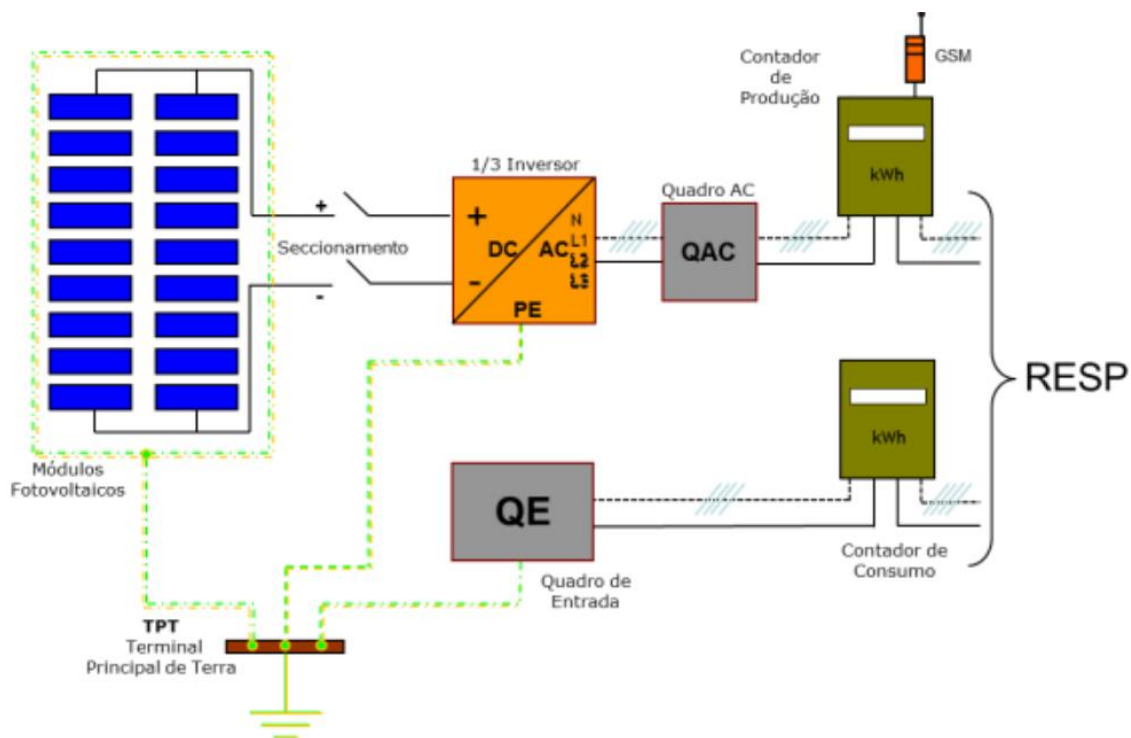


Figura nº 3.1: Sistema de microprodução fotovoltaico ligado à rede. (Fonte: Certiel)

3.1.1 Módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são constituídos por um conjunto de células fotovoltaicas ligadas entre si, em série e em paralelo, permitindo obter a gama de corrente e de tensão desejada para o melhor funcionamento do inversor.

Células fotovoltaicas

O sol é uma estrela que liberta grande quantidade de energia, sobre diferentes comprimentos de onda, designado por espectro solar. A luz apresenta um comprimento de onda de 380 a 780 nanómetros e pertence ao componente visível do espectro electro solar. Quando a luz incide num material, ela pode ser reflectida, transmitida ou absorvida, e, como refere o químico francês Lavoisier, considerado o pai da química moderna, *“Na Natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”*. A absorção da luz representa simplesmente a conversão da energia contida no fotão incidente numa outra forma de energia. Alguns materiais revelam as propriedades adequadas para converter a energia contida nos fotões incidentes em energia eléctrica, designando-se por materiais semicondutores.

O efeito fotovoltaico consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma material semiconductor, produzida pela absorção da luz. A diferença de potencial surge devido à luz ser constituída por fotões que são responsáveis por excitar os electrões do material semiconductor, e estes passam do estado de valência para o estado de condução, gerando a corrente eléctrica sem sentido definido. À dopagem das células fotovoltaicas, por átomos doadores e receptores, permite gerar o campo eléctrico com o sentido bem definido da corrente eléctrica. Nas células dopadas, tal como nos díodos, é necessário gerar uma tensão mínima para que os electrões passem ao estado de condução. Em períodos de baixa radiação não há geração de corrente devido aos fotões não possuírem energia para os electrões passarem ao estado de condução. É no período entre 10h e as 14h, em média, onde a radiação é mais intensa, como refere Benito (2009), ou seja, onde é gerada a maior parte da energia eléctrica. No restante período do dia a radiação pode não possuir energia suficiente para excitar os electrões dos materiais semicondutores de forma a gerar a corrente eléctrica, permanecendo, assim, os painéis desactivados.

No geral, os materiais semicondutores utilizados nos painéis fotovoltaicos são constituídos por cristais de silício. Os átomos de silício, que constituem os cristais, são constituídos por 4 electrões de valência que se ligam aos átomos vizinhos formando 4 ligações covalentes. Um conjunto de átomos de silício ligados entre si forma uma rede cristalina pura. Para gerar o campo eléctrico nas células de silício, estas são dopadas. No caso de se dopar com um átomo dopante doador, como é o caso do estrôncio a qual é constituído por 5 electrões de valência, isso faz com que a rede cristalina permaneça com electrões em excesso. Isso é vulgarmente designada por impureza do tipo n. No caso da rede cristalina ser dopada com um dopante receptor, como é o caso do alumínio que é constituído por 3 electrões de ligação, originam-se lacunas devido à falta de electrões na estrutura cristalina, comumente designada por impureza tipo p.

As células fotovoltaicas são constituídas por duas camadas, uma delas é constituída com cristais dopados com impurezas tipo p e a outra é composta com cristais com impurezas do tipo n, como se pode verificar na figura nº 3.2. Como a sobreposição das camadas gera a zona de depleção, onde se reorganizam os electrões e as lacunas, gera-se um campo eléctrico interno permanente. O campo eléctrico é responsável pelo sentido da corrente nas células. No entanto este obriga à geração de uma tensão mínima nas células para a geração da corrente. Este fenómeno já é bem conhecido na electrónica, visto que é um fenómeno idêntico ao ocorrido nos díodos, como refere Moraes (2009).

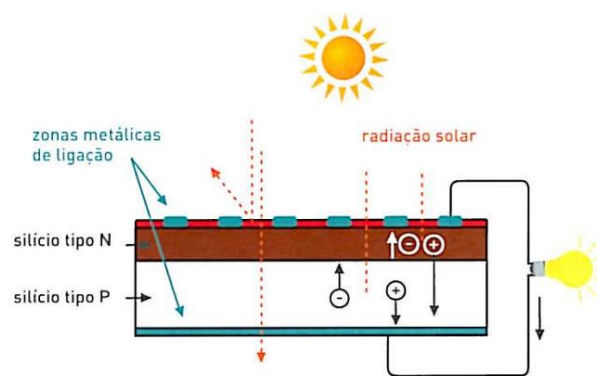


Figura nº 3.2: Célula fotovoltaica. (Fonte: Moraes (2009))

A geração de energia nas células fotovoltaicas consiste em expor a estrutura cristalina de silício dopada com impurezas do tipo n aos raios solares. Os fotões existentes nos raios solares contêm energia suficiente para libertar os electrões da estrutura cristalina, para que estes passem do estado de velocidade ao estado de condução. Graças à camada sobreposta, gera-se atracção dos electrões para os cristais dopados com o tipo p, gerando o sentido bem definido da corrente. Com a deslocação dos electrões é gerada uma diferença potencial (V) e uma corrente eléctrica (I) nas extremidades das células. A este fenómeno de geração de corrente é denominado, como refere Raymond Chang (2005), efeito fotoeléctrico. Devido ao seu funcionamento, as células fotovoltaicas não necessitam de partes móveis para produzir energia eléctrica a partir de radiação do sol.

Tipos de células

O silício é o elemento que mais tem sido utilizado na produção de células fotovoltaicas, para a conversão da energia solar em energia eléctrica. Isso deve-se ao facto de ser um elemento químico com propriedades bem conhecidas nas aplicações industriais. Além disso, é o elemento mais abundante na crosta terrestre, como refere Roriz (2010). A sua exploração, quando aplicada às células fotovoltaicas, tem-se dado de diversas formas: monocristalino, policristalino e amorfo. Actualmente, as células monocristalinas e policristalinas representam uma grande parte das aplicações fotovoltaicas. Embora o silício seja muito abundante na crosta terrestre, não existe no estado puro, mas sim, na forma de sílica ou dióxido de silício. O processo para produzir silício puro, ou seja obter células monocristalinas, é substancialmente caro, razão pela qual surgiram as células policristalinas ou células amorfas que, apesar de menor rendimento, tem vindo a ganhar mercado devido ao menor custo de produção.

O facto de o silício apresentar baixo coeficiente de absorção do espectro da luz solar, para absorver toda a gama espectral da luz visível, este teria que apresentar uma espessura de 2 mm, que devido ao elevado custo da produção do silício no estado puro, tornaria a sua aplicação economicamente insustentável, como refere Roriz (2010). Por esse facto têm surgido estudos de novos materiais com eficiências mais elevadas e menores custo de produção, e aplicação, permitindo a viabilidade e sustentabilidade das aplicações para o futuro.

Células de silício monocristalino

As células de silício monocristalino são obtidas geralmente por fusão electromagnética de lingotes de silício policristalino, arrefecidos lentamente, para permitir a homogeneização do cristal monocristalino de silício. Posteriormente ao arrefecimento são cortadas com uma espessura que varia entre 0,3 a 0,5 mm, à qual se denomina por células fotovoltaicas. Devido às suas características, estas células necessitam de uma estrutura para a sua fixação.

O processo de geração das células monocristalinas requer muita energia quando comparado com as restantes células, tornando-se um produto mais caro no mercado. No entanto, são estas as células que possuem o maior rendimento. No processo industrial o rendimento dos painéis fotovoltaicos constituídos por células monocristalinas varia entre 15% a 18%. As células de silício monocristalino apresentam cor uniforme azul-escuro ou preto. São estas as células que têm tido maior aplicação, representando uma cota de 60% nas aplicações de painéis fotovoltaicos.

Células de silício policristalino

As células de silício policristalino são obtidas por fusão de silício puro, arrefecido lentamente em moldes especiais, permitindo que os átomos se organizem em cristais, formando uma estrutura policristalina. Posteriormente são cortadas com uma espessura 0,3 mm à qual se denominam por células fotovoltaicas. Geralmente são aplicadas em formato rectangular, para uma melhor aplicação e minimização do desperdício. Devido à sua espessura, também necessitam de uma estrutura para a sua fixação. Graças à descontinuidade na estrutura molecular, o seu rendimento ronda os 12% no processo industrial, e apresentam uma cota de 30% no mercado das aplicações de painéis fotovoltaicos.

Células de silício amorfo

Este tipo de células caracteriza-se por não possuir uma estrutura cristalina e o seu coeficiente de absorção ser mais elevado. Isso permite a sua deposição em finas camadas de plasma de silício microcristalino aplicado em plásticos e outros materiais finos, conferindo-lhe flexibilidade. Visto que o seu processo de produção é mais fácil e não necessita de um suporte rígido, as células de silício amorfo apresentam menores custos de produção e aplicação. No entanto, devido aos defeitos estruturais, o seu rendimento é baixo, variando entre 5% e 9%. São estas as células que surgiram mais recentemente no mercado e apresentam uma cota por volta de 7%. Estas células, quando sujeitas a altas temperaturas, apresentam maior estabilidade no seu rendimento, quando comparadas com as células monocristalinas ou policristalinas.

Á uma procura por parte da indústria e universidades de investigação na procura de novas técnicas, novos processos e novos materiais mais acessíveis e eficientes, em alternativa às soluções já existentes. Em alternativa surge, por exemplo, a tecnologia de película fina (TFT) que já representa uma cota de exploração de 10% do mercado, de acordo com Roriz (2010).

Características das células fotovoltaicas

Circuito equivalente

As características das células fotovoltaicas são muito importantes para o dimensionamento do sistema de produção de energia, bem como na definição das melhores condições de funcionamento desse mesmo sistema. As características dos materiais e as etapas a que estes são submetidos são determinantes na eficiência das células fotovoltaicas. Estas, quando expostas à radiação solar, geram uma corrente eléctrica que pode ser armazenada ou regulada para alimentar uma determinada carga.

Deste modo, para compreender melhor a célula fotovoltaica, esta pode ser representada por um circuito eléctrico equivalente que é representada na figura nº 3.3.

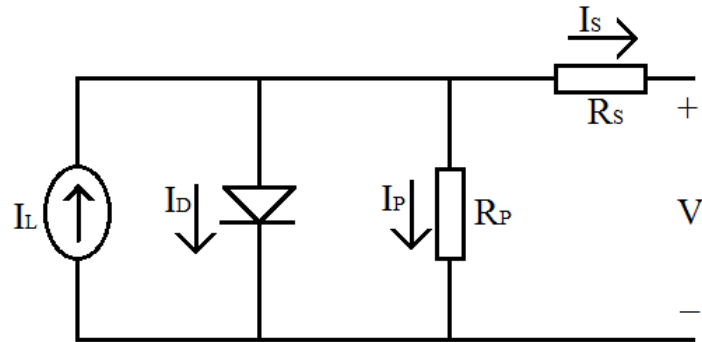


Figura nº 3.3: Circuito representativo de uma célula fotovoltaica.

O circuito representativo de uma célula fotovoltaica inclui uma fonte de contínua, um díodo em paralelo, devido aos efeitos semelhantes com a célula, e duas resistências, uma em paralelo e outra em série. Estas resistências aparecem como resposta a correntes parasitas e à natureza dos materiais utilizados, as quais vão afectar o rendimento da célula ao dissiparem energia sob a forma de calor.

Curva característica de corrente/tensão (I/V)

A representação da célula fotovoltaica permite encontrar as equações básicas que nos ajudam a parametrizar o desempenho da célula fotovoltaica. Pelo facto das células fotovoltaicas possuírem as características eléctricas idênticas a um díodo p-n, a curva corrente/tensão pode ser determinada recorrendo à equação do díodo ideal, como refere Roriz (2010). A equação nº 3.1 representa o comportamento da corrente da célula fotovoltaica, que permite obter a curva característica da corrente/tensão.

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{q(V+R_S I)}{n C_B m T}} - 1 \right] - \frac{V+R_S I}{R_P} \quad (3.1)$$

Para que a célula fotovoltaica seja ideal, a resistência em série (R_S) teria que ser zero, evitando a queda de tensão, e a resistência em paralelo (R_P) teria que ser infinita, para impedir a passagem de corrente o que permitiria que a carga fosse alimentada com a potência máxima (P_{Max}). Todavia, devido aos processos de fabrico e aos materiais utilizados não serem ideais, originam-se resistências associadas às células, descrita pela Lei de Ohm, não permitindo obter a potência máxima das células fotovoltaicas.

Na figura nº3.4 está representada a curva corrente/tensão característica de uma célula fotovoltaica, onde se pode verificar que a corrente se mantém constante desde $V=0$ V até um determinado valor de resistência na carga. Para o circuito aberto (CA) a corrente é zero $I=0$ A e a tensão é máxima. Para o curto-circuito (CC) a corrente é máxima e a tensão é zero $V=0$ V.

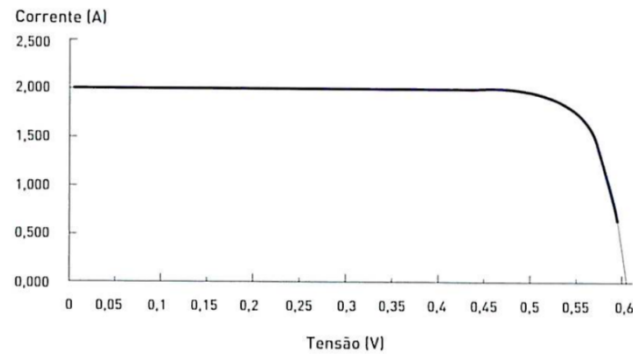


Figura nº 3.4: Curva característica corrente/tensão de uma célula fotovoltaica. (Fonte: Morais (2009))

A curva característica da corrente/tensão varia em função da radiação solar, todavia mantém o mesmo comportamento da linha. Como é de esperar, à medida que aumenta a radiação incidente nas células fotovoltaicas, maior é a energia convertida devido ao aumento da corrente.

Curva característica da potência

Para fazer o melhor aproveitamento do sistema solar fotovoltaico, é necessário conhecer as curvas características da potência, de forma a obter o ponto de potência máxima (MPP), que permite, por conseguinte, obter a melhor eficiência do sistema. Como se verifica na figura nº 3.5, o ponto de potência máxima não ocorre para a corrente máxima nem para a tensão máxima, por causa da resistência dos materiais utilizados nas células e condutores.

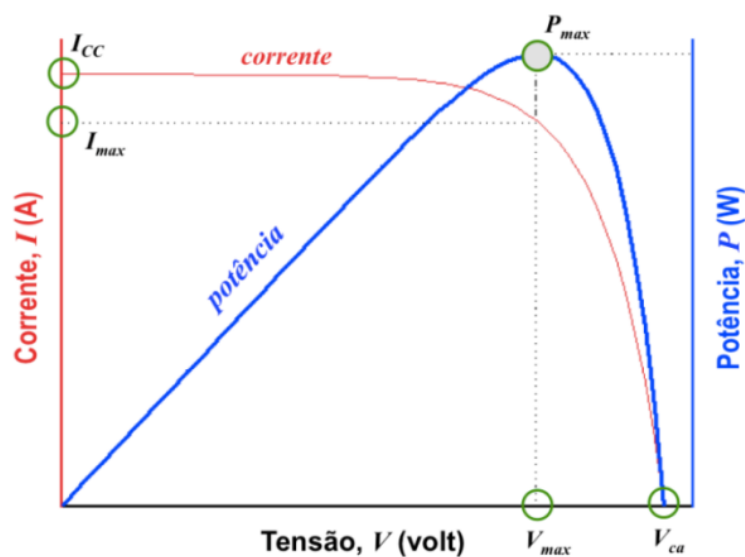


Figura nº 3.5: Curvas característica da corrente/tensão para o ponto de máxima potência de um módulo fotovoltaico. (Fonte: Freitas (2006))

O ponto de potência máxima (MPP) não permanece constante, varia para diferentes intensidades da radiação incidente, visto que esta altera a intensidade de corrente.

Factor de forma

Uma vez que as curvas da corrente/tensão são semelhantes para as diferentes células fotovoltaicas, surgiu a necessidade de contabilizar a variação do ponto óptimo de funcionamento com a introdução do factor de forma (FF). O factor de forma é uma medida que indica a qualidade das células fotovoltaicas, pois traduz o desvio da curva corrente/tensão em relação à curva ideal que é obtida através da comparação entre o ponto de potência máxima (P_{max}) e a potência teórica (P_T). A potência máxima é obtida pelo produto da corrente máxima (I_{max}) e pela tensão máxima (V_{max}), enquanto a potência teórica é obtida pelo produto entre a tensão em circuito-aberto (V_{CA}) e a corrente em circuito-circuito (I_{CC}), como se verifica na figura nº 3.6.

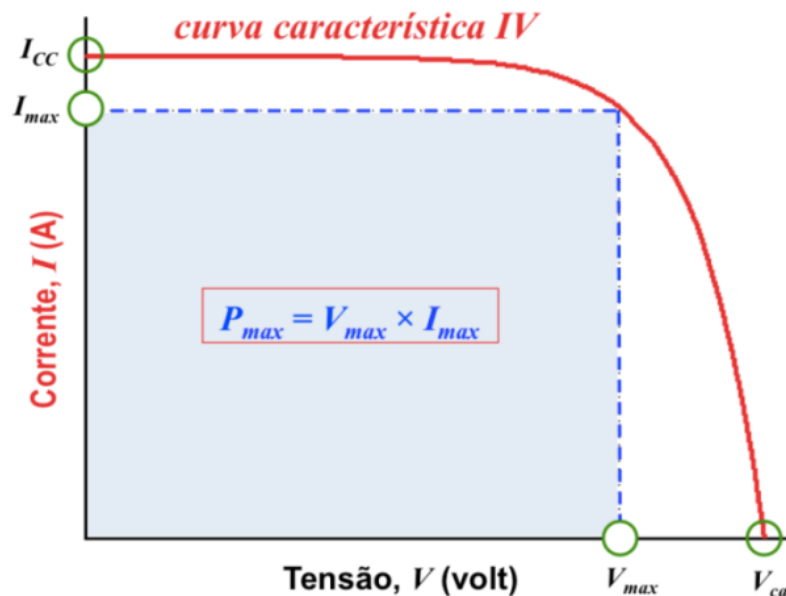


Figura nº 3.6: Factor de forma das células fotovoltaicas (Fonte: Freitas (2006))

$$FF = \frac{P_{max}}{P_T} = \frac{I_{max}V_{max}}{I_{CA}V_{CC}} \quad (3.2)$$

O factor de forma (FF) é um parâmetro adimensional que varia entre 0 e 1. O factor de forma relaciona a potência máxima obtida com a potência do sistema perfeito. Na prática o valor têm variado entre 0,7 e 0,85 para células cristalinas de silício e de 0,5 a 0,7 para as células de silício amorfo. Quanto maior for o factor de forma melhor será o desempenho do sistema fotovoltaico.

Eficiência (η)

A eficiência é outro parâmetro utilizado na comparação das diferentes células fotovoltaicas. Representa a percentagem de energia solar incidente convertida em energia eléctrica. Este valor é obtido na divisão da potência fornecida pela célula (P_{out}), sobre a potência da radiação parametrizada (P_{in}). A potência fornecida (P_{out}) é o mesmo que a potência máxima obtida na célula fotovoltaica (P_{max}). A potência parametrizada (P_{in}) resulta do produto da irradiação *standard* (I_{DS}) com a área exposta a radiação (A_s).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{I_{DS}A_s} \quad (3.3)$$

Como a potência máxima obtida nas células depende de vários factores, mostra-se necessário parametrizar os valores referentes à temperatura de funcionamento e à intensidade luminosa incidente na célula. Para comparar as medições efectuadas para diferentes células, assume-se o valor padrão de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ para temperatura de funcionamento e $1000\text{W}/\text{m}^2$ para a intensidade luminosa incidente, sendo que este valor apresenta a distribuição espectral equivalente à do espectro solar na superfície da Terra e perpendicular aos raios solares, de referência AM=1,5. Estes valores estão de acordo com Roriz (2010) e são adoptadas nos ensaios dos módulos fotovoltaicos, pelo que são habitualmente apresentados nas folhas técnicas dos mesmos.

Eficiência Termodinâmica (ET)

Como dita a 2ª Lei da Termodinâmica, a energia proveniente do Sol, sob forma de radiação, não pode ser convertida a 100% em energia eléctrica. Isso deve-se ao facto do “limite de eficiência termodinâmica” que defende, para qualquer processo de transformação de energia, a existência de perdas térmicas. Num estudo realizado no ano de 1961 ficou definido, pelo limite de *Shockley-Queisser*, que as células fotovoltaicas de silício de junção p-n, que possuem um hiato energético entre 1 a 1,7 [eV], denominadas por células de película fina, conseguem uma conversão máxima teórica de 31% na sua eficiência termodinâmica. Estas perdas de energia surgem como consequência da formação de calor nas células fotovoltaicas, visto a energia do fóton existente na radiação incidente não possuir energia suficiente, ou possuir energia excessiva para excitar os pares de electrões-lacunas. Esta energia insuficiente ou excedente não contribui para a geração de energia eléctrica, sendo convertida em calor.

Eficiência Quântica (EQ)

Como já foi referido, a radiação incidente nas células fotovoltaicas, excita os electrões e estes passam do estado de velocidade para o estado de condução. Porém nem todos os electrões no estado de condução contribuem para a geração de corrente, visto que alguns desses electrões, ao percorrer a célula, reorganizam-se, retornando novamente ao estado de velocidade, não contribuindo, assim, para a geração de corrente.

No livro Roriz (2010) existe uma referência a estes electrões, que passam do estado de condução para o estado de velocidades sem contribuir para a geração de corrente e que pode ser quantificada pela EQ. Com o conhecimento da EQ é possível quantificar a gama de espectro que é absorvida pelas células, e assim proceder ao planeamento de métodos que vão ao encontro da maximização da absorção da radiação.

A grande diversidade de características das células fotovoltaicas existentes no mercado está relacionada com diversos factores. Estes vão desde a escolha do processo de fabrico aos materiais utilizados por causa do processo de montagem, desde as condições da radiação incidente às condições de funcionamento. Contudo, as características das células fotovoltaicas são o resultado inevitável das limitações da física, das limitações tecnológicas, ou mesmo da natureza dos materiais.

Associações das células e dos módulos fotovoltaicos

As células de silício estabelecem o seu encaixe e a sua ligação através de contactos metálicos, frontal e posterior às células, formando o circuito onde é extraída a corrente gerada. Os contactos metálicos permitem a ligação a todas as células e devem possuir uma baixa resistência Óhmica, de forma a minimizar as perdas consequentes do efeito de Joule. O contacto superior apresenta um formato de grelha para diminuir o efeito de sombreamento das células. Na superfície das mesmas é aplicado uma película fina com propriedades transparentes e anti-refletora de forma a minimizar a reflexão, melhorando a sua eficiência. A fim de proteger os constituintes do circuito fotovoltaico das condições adversas da atmosfera, estes são encapsuladas em módulos, cuja parte superior é constituída por uma cobertura transparente, de modo a deixar passar a radiação solar, que, pela sua fácil limpeza, geralmente é vidro.

As características das células fotovoltaicas são muito importantes no dimensionamento das ligações dos sistemas de geração fotovoltaica. Para facilitar a utilização desta tecnologia, as células fotovoltaicas são fornecidas pela indústria em módulos, com as suas características bem definidos nas folhas técnicas. Nas aplicações comerciais, os módulos são conjugadas em série e/ou em paralelo formando o gerador fotovoltaico com os parâmetros desejados de tensão e de corrente. Pode ser observado na figura nº 3.7 um exemplo de associação de células em módulos fotovoltaicos.

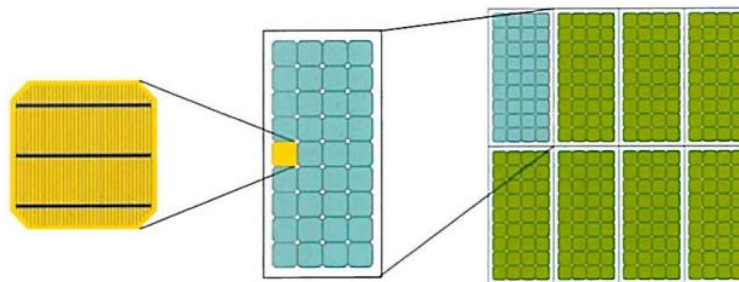


Figura nº 3.7: a) Célula Fotovoltaico; b) Módulo Fotovoltaico; c) Gerador Fotovoltaico.

(Fonte: Morais (2009))

Como se observa na figura nº 3.7, por causa da necessidade de injectar na rede de distribuição a energia gerada pelo gerador fotovoltaico, faz-se associações em série e/ou em paralelo entre os módulos fotovoltaicos de forma a obter a gama de tensão e de corrente de funcionamento adequadas à entrada do inversor.

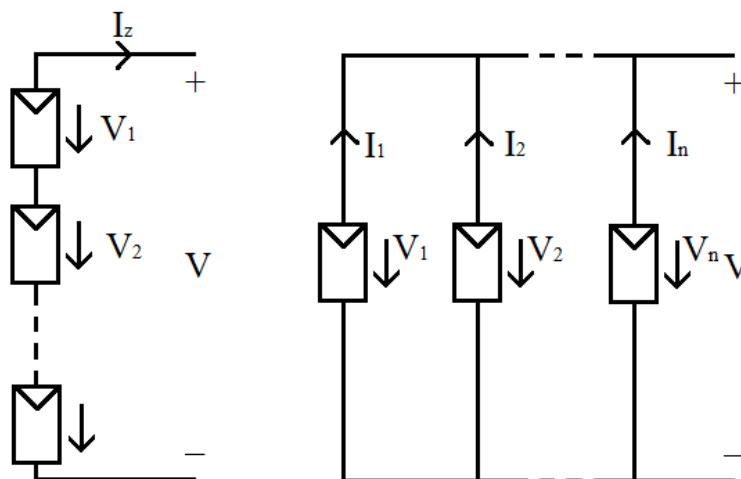


Figura nº 3.8: Módulo Fotovoltaico: a) ligação em série; b) ligação em paralelo.

A associação em série dos módulos fotovoltaicos permite obter maiores tensões para a mesma corrente, enquanto que na associação dos módulos em paralelo obtém-se maiores correntes para a mesma tensão.

Características dos módulos fotovoltaicos

As características das curvas da corrente/tensão e da potência dos módulos apresentam um comportamento idêntico às curvas das células às quais são constituídos. No entanto, existe no mercado uma grande variedade de módulos, em que tanto as suas características como o seu funcionamento estão definidas pelo fabricante na folha técnica do equipamento correspondente. A escolha dos módulos a implementar numa unidade fotovoltaica de microprodução está relacionada com as condições do meio envolvente à qual estes vão ser implementados, assim como com os meios financeiros disponíveis ou, ainda, a disponibilidade de módulos no mercado.

3.1.2 Inversores

A energia proveniente das unidades de microprodução é injectada na rede de distribuição, independentemente do tipo de tecnologia implementada. Não obstante, para que tal seja possível é necessário adequar os parâmetros da energia gerada com os parâmetros da rede. Nas unidades fotovoltaicas de microprodução como a energia gerada pelo gerador fotovoltaico é de corrente contínua (DC) e a energia que circula na rede é de corrente alternada (AC), sendo, por consequência, necessária a utilização de um inversor DC/AC para converter a corrente contínua, gerada pelo gerador fotovoltaico, em corrente alternada, com as devidas características de tensão, frequência e factor de potência da rede de distribuição. Deste modo, com a utilização do inversor DC/AC são estabelecidas as condições para que a energia gerada pelo gerador fotovoltaico seja injectada na rede de distribuição.

Apesar do aumento significativo das aplicações de microprodução, os inversores representam um peso importante no investimento desta área, podendo chegar a 15% do montante aplicado. Porém é um componente fundamental na aplicação das unidades fotovoltaicas de microprodução, de forma que a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos seja injectada na rede de distribuição com as devidas características.

Com o intuito de garantir que a energia gerada pelas unidades fotovoltaicas de microprodução não perturbe significativamente a rede de distribuição e estabeleça a segurança das pessoas e bens, o inversor DC/AC tem que apresentar o certificado reconhecido pela rede de distribuição de energia. Estes certificados garantem que os harmónicos gerados pelo inversor estejam dentro dos parâmetros exigidos, como assegurar que o inversor proceda à interrupção da sua ligação em situações de falta de tensão na rede de distribuição, ou mesmo quando estes apresentem valores da tensão e da frequência fora dos padrões estabelecidos.

Os inversores DC/AC mais utilizados baseiam-se em tecnologia de electrónica dos MOSFET, GTO e IGBT, podendo ser instalados com um transformador na saída, de maneira a reduzir os harmónicos derivados da comutação, como refere Carvalho (2011). Como título de exemplo na figura nº 3.9 apresenta-se um inversor autocontrolado com transformador, à direita apresenta-se a comutação do inversor que dá origem à onda sinusoidal.

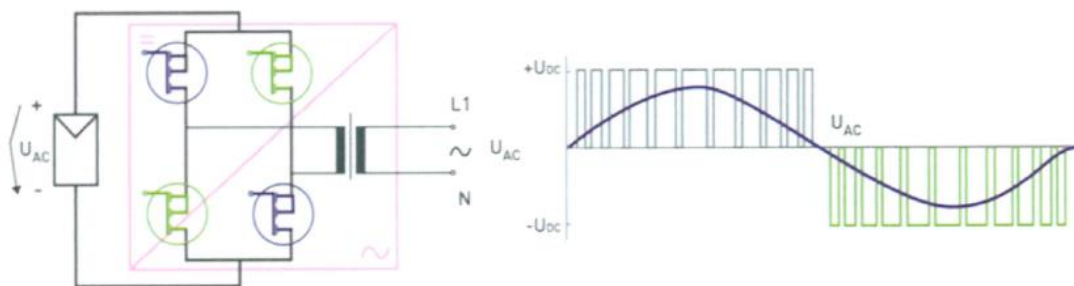


Figura nº 3.9: Inversor autocontrolado com transformador. (Fonte: Morais (2009))

A tensão de entrada do inversor (em cada fileira) é dada pelo somatório das tensões individuais dos módulos em série, e a corrente de entrada do inversor é dada pelo somatório das correntes por fileira. Tendo em conta as condições de funcionamento das unidades fotovoltaicas de microprodução, a tensão e a corrente não permaneceram constantes ao longo do ano, nem ao longo do dia, não permitindo sempre a maior eficiência de conversão do inversor. A constante variação da radiação e da temperatura origina variações na corrente e tensão gerada pelas células. A variação da corrente e da tensão provoca uma constante variação do ponto de potência máxima. O ponto de potência máxima representa o ponto caracterizado pela tensão e pela corrente geradas no gerador fotovoltaico onde é obtida a maior eficiência de conversão da corrente contínua para corrente sinusoidal. Ao ocorrer a variação simultânea da tensão e da corrente, a constante variação do ponto de potência máxima do gerador fotovoltaico não permite ao inversor trabalhar sempre com a maior eficiência de conversão. Os inversores utilizados nas unidades fotovoltaicas de microprodução permitem obter ponto de potência máxima para uma gama de tensões restritas descrita na folha técnica de equipamento. Existem equipamentos no mercado, como os conversores de potência, que permitem ao inversor trabalhar sempre no ponto de potência máxima, obtendo melhores resultados de conversão. No entanto estes equipamentos são muito dispendiosos para as unidades fotovoltaicas de microprodução.

A radiação no inverno, as elevadas temperatura no verão e mesmo o envelhecimento dos equipamentos fazem o gerador funcionar, na maior parte do tempo, a 50% da sua potência nominal, como refere Macedo (2006) e Roriz (2010), não permitindo ao inversor funcionar no ponto de potência máxima. Nas grandes unidades fotovoltaicas podem-se encontrar aplicações que permitem tornar o sistema de conversão da energia mais eficiente ao serem implementados mais do que um inversor. Nestes, para valores de baixa radiação apresenta-se em funcionamento o inversor “mestre”, contudo, com o aumento da radiação este atinge o limite de potência, activando o inversor “escravo”. Estas aplicações que apresentem mais que um inversor permitem obter maiores eficiências na conversão da energia, no entanto exigem um investimento inicial mais elevado. Nas unidades fotovoltaicas de microprodução em que a potência pode ir até 5,75kW não se justifica a aplicação de mais do que um inversor, como refere Roriz (2010).

Para evitar que o inversor funcione com uma baixa eficiência foi criado o Factor de Dimensionamento do Inversor (FDI), este representa a relação entre a potência do inversor (P_{inv}) e a potência do gerador fotovoltaico (P_{FV}), segundo Carvalho (2011), o “FDI representa a relação entre a potência nominal do inversor e a potência nominal máxima dos painéis fotovoltaicos”. Este parâmetro surge como resposta à necessidade de estabelecer o compromisso entre a potência do inversor e a potência do gerador fotovoltaico, que implique menos perdas na conversão da DC para AC. O FDI é dado pela equação nº 3.4:

$$FDI = \frac{P_{inv}}{P_{FV}} \quad (3.4)$$

Caso se pretenda que o inversor permaneça a funcionar com a maior eficiência em períodos de elevada radiação, deve optar-se por instalar um inversor com potência superior à potência do gerador fotovoltaico ($P_{inv} > P_{FV}$; $FDI > 1$). Todavia, para períodos de baixa radiação o inversor pode apresentar-se desactivo devido ao seu sobredimensionamento.

Se a potência do inversor for inferior à potência dos geradores fotovoltaicos ($P_{inv} < P_{PV}$; $FDI < 1$), o inversor estará a funcionar na maior parte do tempo com a maior eficiência. Este sobredimensionamento do gerador pode provocar a desconexão do inversor em situações esporádicas, em que sejam alcançadas elevadas radiações e baixas temperaturas.

Por outro lado, se se pretender que o inversor permaneça sempre em funcionamento, quando é fornecida energia pelo gerador, deve-se estabelecer um rácio entre a potência do inversor e do gerador de 1:1, ou seja, a potência do gerador tem que ser igual à potência de entrada do inversor ($P_{FV} = P_{inv}$; $FDI = 1$). Este sistema permite que o inversor esteja em funcionamento sempre que seja fornecida energia pelo gerador, visto que as tensões deste não ultrapassam a gama de tensões de funcionamento do inversor.

Para as unidades fotovoltaicas de microprodução existem diversas empresas que produzem inversores exclusivamente para este mercado, tendo em conta a variação do ponto de potência máxima, permitindo que o inversor apresente a maior eficiência para o $FDI = 1$.

Com a evolução da tecnologia, hoje em dia existem no mercado inversores que desempenham um conjunto de funções significativas, tornando-se num equipamento que influencia significativamente o desempenho no sistema de geração de energia. Estas funções passam por:

- Converter a corrente contínua gerada no gerador fotovoltaico em corrente alternada com as devidas características de frequência e tensão da rede;
- Ajustar o funcionamento para o ponto de potência máxima do gerador fotovoltaico;
- Sinalizar, visualizar, registar e transferir os dados referentes ao funcionamento;
- Proteger os equipamentos e as pessoas de factores externos e internos à unidades, como as sobrecargas, sobretensões, protecção da polaridade e protecção da rede.

Estes factores levam a que o inversor tenha um papel preponderante no dimensionamento das unidades fotovoltaicas de microprodução.

Características dos inversores

Alguns dos parâmetros mais importantes na implementação deste equipamento são a potência, a tensão e a corrente, visto que são estes os factores que mais influenciam no dimensionamento de uma unidade fotovoltaica de microprodução. A eficiência do inversor também é um parâmetro importante que, apesar de se apresentar geralmente elevado, uma pequena diferença acaba por ser significativa quando se trata de longos períodos de funcionamento, como é o caso das unidades fotovoltaicas de microprodução que se pretende que tenham um período de vida de cerca de 30 anos.

A eficiência de conversão do inversor (η_{inversor}) relaciona a potência de entrada com a potência de saída no inversor, determinando as perdas obtidas por este.

$$\eta_{\text{inversor}} = \frac{\text{Potência de saída efectiva, } P_{AC}}{\text{Potência de entrada efectiva, } P_{DC}} \quad (3.5)$$

O valor da eficiência dos inversores situa-se entre 86% a 95%, como refere GREENPRO (2004).

3.1.3 Contadores

Os contadores têm a função de medir a quantidade de energia transaccionada entre o operador da rede de distribuição de energia e os microprodutores. É, adicionalmente, utilizado por todos os consumidores de energia eléctrica que estão conectados à rede de distribuição.

Genericamente, podem ser adoptadas dois tipos de configuração quanto à utilização dos contadores, em que:

- Aplicam-se dois contadores unidireccionais, em que um regista a quantidade de energia consumida da rede e o outro regista a energia que é injectada na rede;
- Aplica-se um único contador bidireccional que regista a energia que é consumida ou injectada na rede;

Como as unidades fotovoltaicas de microprodução são, usualmente, implementadas em edifícios existentes, que já possuem um contador unidireccional, ao instalar o sistema de microprodução é também instalado um contador exclusivamente para a produção deste sistema. Adicionalmente, pelo facto das tarifas cobradas pela energia consumida e produzida serem diferentes, é igualmente impraticável a utilização de um único contador bidireccional.

3.1.4 Cabos

Os cabos, de um ou mais condutores isolados, permitem a ligação de todos os elementos que constituem as unidades fotovoltaicas de microprodução, compondo o circuito eléctrico que permite que a energia gerada chegue a rede. Nas unidades fotovoltaicas de microprodução são aplicados três tipos distintos de cabos, uma vez que apresentam diferentes intensidades de tensão e de corrente: os cabos de módulos, os cabos DC e os cabos do ramal AC. Os cabos são geralmente são constituídos por um condutor de alumínio ou cobre.

Os cabos de módulos, como o próprio nome indica, estabelecem a ligação eléctrica entre os vários módulos. Os cabos DC são utilizados para fazer a ligação do gerador ao inversor. Os cabos de módulos e os cabos DC são designados por cabos solares visto que estes estão expostos a altas temperaturas bem como à radiação solar, nomeadamente aos ultravioletas (UV). Estes tipos de cabos são apropriados para correntes mais elevadas, por isso é nestes que se dão as maiores perdas por condução. Os cabos do ramal AC são utilizados na ligação do inversor com o contador e, posteriormente, à rede de distribuição, permitindo que a energia gerada seja injectada na rede de distribuição de energia.

3.1.5 Suportes

Os módulos fotovoltaicos são instalados em suportes apropriados, que não só permitem um bom desempenho durante o tempo de vida útil do equipamento, como também devem garantir a segurança das pessoas e dos bens. Um bom posicionamento dos módulos fotovoltaicos é um factor determinante na eficiência das unidades fotovoltaicas de microprodução.

Os materiais utilizados nos sistemas de fixação dos painéis fotovoltaicos têm que ter em consideração as várias condições adversas ambientais a que estão sujeitas. Factores como a força e a pressão dinâmica exercida pelo vento, a formação de gelo, o peso exercido pela acumulação de neve e as variações da temperatura, têm que ser levados em conta na fase de escolha dos materiais.

Podem diferenciar-se dois tipos de estruturas de suporte aplicadas nas unidades fotovoltaicas de microprodução, como se representada no organigrama da figura nº 3.10.

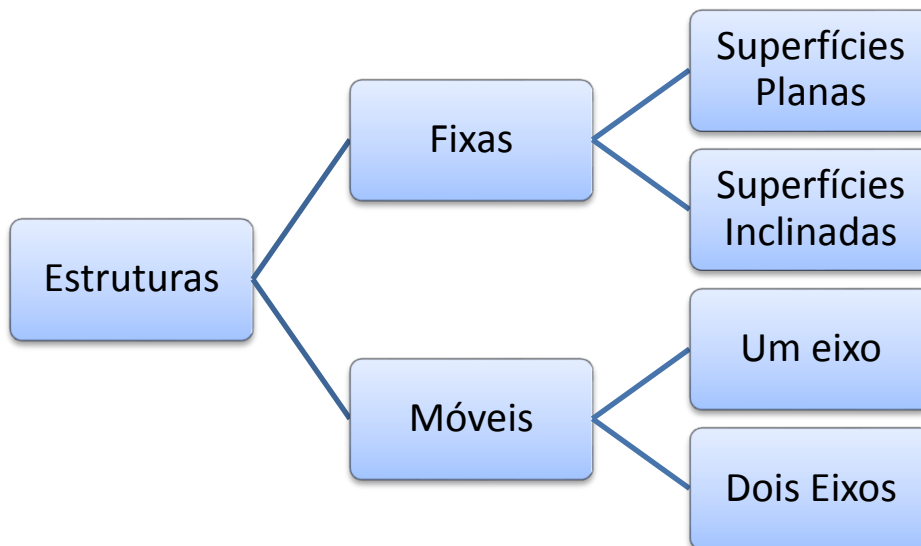


Figura nº 3.10: Organigrama referente às estruturas aplicadas nas unidades fotovoltaicas

Estruturas fixas

As estruturas fixas devem conceder aos módulos a posição mais adequada onde estes apresentam a maior conversão de energia ao longo do ano. Para tal, a estrutura deve permitir que os módulos obtenham o maior número de horas anuais com a radiação perpendicular à sua superfície. No caso das estruturas fixas, estas devem possibilitar que os módulos fotovoltaicos fiquem direccionados para o Sul geográfico com uma inclinação próximo de trinta e cinco ($\alpha=35^\circ$) face ao plano horizontal, e com o azimute igual a zero graus ($\phi=0^\circ$), evitando sempre qualquer sombreamento nas horas de produção para à latitude correspondente a Portugal.

Estruturas móveis

As estruturas móveis, ou seguidores solares, podem ser de um ou dois eixos, como se observa na figura nº 3.11, e caracterizam-se por acompanharem a direcção do Sol. Este seguimento da direcção do Sol permite melhorar a geração de energia dos módulos fotovoltaicos, visto que as células estão durante mais tempo expostas na perpendicular com a radiação do Sol. Os seguidores solares de dois eixos têm tido maior aplicação quando se trata de um número reduzido de painéis solares, como é o caso das unidades fotovoltaicas de microprodução. Apesar disso, o seguimento solar ainda não tem muitos adeptos, essencialmente pelo facto de aumentar da complexidade da instalação, da manutenção, bem como o aumento do investimento.

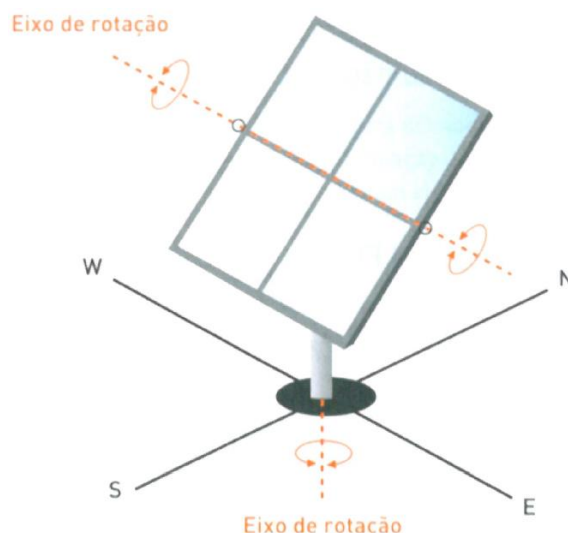


Figura nº 3.11: Unidade fotovoltaica com duplo seguimento solar: Norte-sul, Este-Oeste. (Fonte: Morais (2009))

Verifica-se nos sistemas de dois eixos o aumento da complexidade e aumento do investimento em virtude da necessidade de utilizar diferentes mecanismos, como motores, de forma que os módulos fotovoltaicos se orientem constantemente em direcção ao sol.

3.1.6 Dispositivos de protecção

Os elementos de protecção são muito importantes nas aplicações das unidades fotovoltaicas de microprodução. Quando bem aplicados e dimensionados, asseguram um pleno funcionamento dos equipamentos, estabelecendo a segurança das pessoas, animais e bens durante a vida útil do equipamento. Os mais utilizados nos sistemas de microprodução são os fusíveis, os disjuntores, os disjuntores diferenciais, os eléctrodos terra e o descarregador de sobrecargas. Estes dispositivos não previnem a origem das perturbações, mas, quando as unidades são sujeitas a estas condições, permitem isolar os equipamentos, evitando que as perturbações prejudiquem a integridade dos equipamentos ou das pessoas.

Existem diversas causas que fazem surgir a alteração dos valores nominais da tensão e da corrente, conduzindo às perturbações. Fazem parte destas causas naturais as descargas atmosféricas, as fugas de corrente que provocam valores desenquadrados da resistência, a comutação do inversor que induz valores desajustados da corrente e de tensão da rede e harmónicos, etc..

Os fusíveis são dispositivos de protecção de curto-circuitos e de sobrecargas, designados por sobreintensidades, evitando que os equipamentos eléctricos sejam percorridos por correntes que lhes sejam prejudiciais. Estas sobreintensidades são responsáveis pela deterioração das características mecânicas dos condutores, dos isolamentos e até das próprias canalizações eléctricas. O princípio de funcionamento dos fusíveis, segundo Morais & Pereira (2007), baseia-se na fusão de um filamento condutor, originado pelo efeito de Joule, para condições pré-definidas. Uma vez a fusão do filamento, este fica inutilizável e a ligação do circuito é interrompida até à mudança por um fusível novo.

Os disjuntores são dispositivos que apresentam a mesma função que os fusíveis. São adicionalmente utilizados em manobras de manutenção. Os disjuntores após actuarem podem ser rearmados, pois o seu funcionamento baseia-se no princípio magnetotérmico, originado pelo efeito de Joule, em circunstâncias pré-definidas, como refere Morais & Pereira (2007).

O descarregador de sobretensões permite desviar para o eléctrodo terra as sobrecargas originadas por descargas atmosféricas que podem atingir uma grandeza que cause graves danos, como refere Morais & Pereira (2007). Os descarregadores de sobretensões são aplicados com a finalidade de proteger os dispositivos dos circuitos eléctricos de tensão e correntes acima dos parâmetros estipulados.

Os disjuntores diferenciais são aparelhos de corte automático que têm como função proceder à desconexão das unidades de microprodução caso sejam detectadas fugas de corrente, permitindo a protecção de pessoas no caso de entrarem em contacto com elementos activos, como refere Morais & Pereira (2007).

O eléctrodo terra é utilizado para a protecção das pessoas e bens materiais, visto que é um ponto de descarga de baixa resistência dos equipamentos para a terra utilizado nas unidades fotovoltaicas de microprodução, onde as cargas eléctricas são dissipadas em segurança. A ligação ao eléctrodo terra faz parte das medidas activas e passivas adoptadas nos sistemas de microprodução. A ligação das componentes metálicas ao eléctrodo terra faz parte das medidas passivas que não só permitem minimizar o impacto das descargas atmosféricas sobre os equipamentos, bem como cargas que transitem nos mesmos, visto que estas são desviadas para o eléctrodo terra. A ligação dos dispositivos de corte à terra faz parte das medidas activas, permitindo, no caso de subtensões e subcorrentes, que estas sejam desviadas para o eléctrodo terra.

Os díodos de desvio e díodos de fileira permitem minimizar o impacto de avarias ou sombreamentos dos módulos fotovoltaicos. Em série são aplicados díodos de desvio que permitem o seu normal funcionamento mesmo com módulos desactivados, devido à passagem da corrente pelos díodos de desvio que estão instalados em paralelo com os módulos. Em paralelo são aplicados díodos de fileira evitando curto-circuitos e correntes inversas para o caso de eventuais avarias ou aparecimento de diferentes potências nas fileiras. Caso os módulos tenham todos a mesma característica e as fileiras apresentem o mesmo número de módulos, pode optar-se por aplicar fusíveis nas extremidades das fileiras, em vez dos díodos de fileira, para protecção das sobreintensidades. As ligações dos díodos de desvio ou de fileira são pouco utilizadas visto o inversor apresentar as devidas características de protecção. Este tipo de ligações pode ser observado na figura nº 3.12.

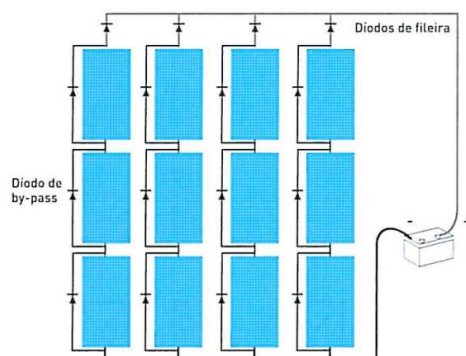


Figura nº 3.12: Diodos de desvio e de fileira. (Fonte: Morais (2009))

3.2 Planeamento de uma unidade fotovoltaica de microprodução

A fim de proceder à fase de planeamento de uma unidade fotovoltaica de microprodução é necessário fazer visitas técnicas ao local para recolher informação, avaliação e documentação referente à descrição do mesmo. Nesta visita pretendem aferir-se as várias alternativas de projecto, de modo que se possa optar pelas condições mais favoráveis ao funcionamento e rentabilização do projecto. Na visita ao local deve prever-se o espaço que melhor satisfaça a localização do gerador solar, do inversor e do contador, bem como os procedimentos necessários para a sua instalação. O sombreamento é um factor que influencia significativamente a produção de energia, por isso deve ser feita uma avaliação dos sombreamentos a que estão sujeitos os possíveis locais para a instalação do gerador. Este factor pode ser decisivo na escolha de instalação de todo o projecto, visto minimizar o seu impacto. Uma avaliação aprofundada na fase de planeamento poderá traduzir-se significativamente numa maior rentabilização do projecto.

Os dados que terão que ser avaliados na visita ao local são:

- A área existente no local mais adequada para a implementação da unidade fotovoltaica de microprodução;
- A orientação e a inclinação das áreas disponíveis;
- A estrutura existente na área à qual vão ser fixados os suportes para módulos fotovoltaicos;
- Avaliação de eventuais sombreamentos;
- Potenciais locais nos quais podem ser instalados os restantes componentes, como o inversor, dispositivos de protecção e caixas de junções;
- Potência a instalar;
- Método de instalação e equipamentos necessários;
- Recolha de documentos que contenham informações, como a planta do terreno ou do edifício.

Todos estes factores vão ser determinantes no desenvolvimento do projecto, devendo este ser efectuado com o devido cuidado.

3.3 Dimensionamento de uma unidade fotovoltaica de microprodução

O dimensionamento de uma unidade fotovoltaica de microprodução envolve a aplicação de um conjunto vasto de conhecimentos de diversas áreas. Todavia, a fase de dimensionamento não está relacionada directamente com a produção de equipamentos específicos para cada aplicação, visto que tornaria as aplicações economicamente inviáveis. Esta fase implica a aplicação dos conhecimentos para a conjugação de diferentes equipamentos existentes no mercado, de tal modo que possam funcionar como um todo ao menor custo.

As unidades fotovoltaicas de microprodução apresentam-se mais simples do que os sistemas fotovoltaicos isolados, visto a rede desempenhar o papel de acumulador de toda a energia produzida. No dimensionamento das unidades fotovoltaicas de microprodução tem-se como ponto de partida a definição da potência que se pretende instalar, uma vez que esta apresenta diferentes exigências na escolha dos equipamentos para a melhor solução.

A fase de dimensionamento não só consiste na conjugação dos diferentes elementos que melhor satisfaçam as exigências impostas para a implementação da unidade fotovoltaica de microprodução, como também as suas interligações, sem que a integridade e o funcionamento dos componentes do sistema sejam postos em causa. De um modo geral, os equipamentos utilizados no sistema de microprodução são: o gerador, constituído pelos módulos ligados em série e/ou em paralelo; o inversor; o contador; os cabos, cabos dos módulos, cabos DC e cabos AC; o sistema de protecção, fusíveis, disjuntores, descarregadores atmosféricos; e a estrutura de suporte.

3.3.1 Dimensionamento do gerador fotovoltaico

O gerador fotovoltaico é o elemento principal do sistema de microprodução, pois é este elemento que permite a conversão da radiação solar em energia eléctrica. O dimensionamento do gerador fotovoltaico tem como objectivo alcançar a potência desejada para a instalação, sem pôr em causa o normal funcionamento dos elementos que constituem a unidade fotovoltaica de microprodução. Consoante a localização, e a área disponível para a instalação da unidade fotovoltaica de microprodução, serão seleccionados os módulos que constituem o gerador fotovoltaico. O dimensionamento do gerador fotovoltaico consiste na conjugação da ligação em série e em paralelo dos módulos fotovoltaicos, com o intuito de alcançar a potência desejada sem que a tensão e a corrente estejam fora da gama admissível da entrada do inversor.

Como a tensão máxima e mínima atingidas pelo módulo dependem da temperatura de funcionamento, e como esta também depende da localização da instalação, estes valores têm que ser calculados, pois não são apresentados na ficha técnica dos módulos. No panorama geral, em Portugal a temperatura mínima de funcionamento dos módulos considerada ocorre no inverno e é igual a -10°C , enquanto a temperatura máxima considerada ocorre no verão e é de 70°C , ainda que estes parâmetros sejam influenciados pela localização da instalação do gerador fotovoltaico. Independentemente do local disponível para a instalação do gerador fotovoltaico, deve-se, sempre que possível, privilegiar uma instalação ventilada, visto que a temperatura influencia significativamente a eficiência dos módulos fotovoltaicos.

O inversor pode ser constituído por um conjunto de entradas, muitas vezes designadas por *strings* ou vias, descritas na folha técnica do equipamento. As *strings* do inversor caracterizam-se por uma determinada gama de tensão e de corrente de funcionamento, que deve ser respeitada nas ligações dos módulos fotovoltaicos. Enquanto que a tensão de entrada de cada *string* é dada pelo somatório das tensões do conjunto de módulos fotovoltaicos ligados em série, a corrente de entrada de cada *string* é dada pelo somatório das fileiras em paralelo dos módulos fotovoltaicos. Para assegurar o normal funcionamento das unidades fotovoltaicas de microprodução é necessário garantir que as características da corrente e da tensão estejam dentro das tolerâncias das *strings* do inversor. Com o conhecimento das características dos módulos, do inversor e do local, pode obter-se o número máximo de módulos ligados em série e em paralelo para cada *string*.

O número de módulos ligados em série, para cada *string*, é dado pela divisão da tensão máxima de entrada do inversor pela tensão máxima atingida pelo módulo, que ocorre em circuito aberto (CA) e para a menor temperatura de funcionamento. O número máximo de módulos ligados em série para cada *string* é dado e pela equação nº 3.6:

$$N_{max} \leq \frac{V_{max} (inversor)}{V_{CA} (módulos a -10^{\circ}\text{C})} \quad (3.6)$$

Como se trata da tensão máxima para o funcionamento do inversor, o número de módulos é dado pelo menor valor inteiro da divisão.

Considerando a temperatura mínima de -10°C de funcionamento do módulo, pode calcular-se a tensão máxima atingida por este, que é dada pelas equações 3.7 ou 3.8.

$$V_{CA} (módulo a -10^{\circ}\text{C}) = \left[1 - \frac{35 \times \Delta V [\%]}{100} \right] \times V_{CA(STC)} \quad (3.7)$$

ou

$$V_{CA} (módulo a -10^{\circ}\text{C}) = V_{CA(STC)} - \frac{35 \times \Delta V [mV]}{1000} \quad (3.8)$$

Para o normal funcionamento do inversor, também tem que se garantir que a tensão mínima do conjunto de módulos fotovoltaicos seja superior ou igual à tensão funcionamento de cada *string*.

O número mínimo de módulos ligados em série é dado pela divisão entre a tensão mínima de funcionamento do inversor e a tensão mínima atingida pelo módulo para a maior temperatura de funcionamento. O número mínimo de módulos ligados em série para cada *string* é dado pela equação 3.9.

$$N_{min} \geq \frac{V_{min} (inversor)}{V_{(módulos a 70^{\circ}C)}} \quad (3.9)$$

Como se trata de tensão mínima para o funcionamento do inversor, o número de módulos é dado pelo arredondamento em excesso do valor da divisão.

Considerando a temperatura máxima de 70°C de funcionamento do módulo, pode-se calcular a tensão mínima atingida por este através das equações 3.10 ou 3.11.

$$V_{MPP} (módulo a 70^{\circ}C) = \left[1 + \frac{45 \times \Delta V [\%]}{100}\right] \times V_{MPP(STC)} \quad (3.10)$$

ou

$$V_{MPP} (módulo a 70^{\circ}C) = V_{MPP(STC)} + \frac{45 \times \Delta V [mV]}{1000} \quad (3.11)$$

Com o intuito de assegurar o normal funcionamento do inversor, é necessário garantir que a corrente do gerador não ultrapasse, em qualquer circunstância, a corrente de entrada de cada *string*. Esta é dada pelo somatório das correntes das fileiras dos módulos. O número máximo de fileiras é determinado pela divisão da corrente máxima de entrada do inversor e a corrente máxima duma fileira, que é igual à corrente no módulo, dada pela equação 3.12.

$$N_{fileira} \leq \frac{I_{máx} (inversor)}{I_{n fileira}} \quad (3.12)$$

Como se trata de corrente máxima para o funcionamento do inversor, o número de fileiras é dado pelo valor inteiro da divisão.

O dimensionamento do número máximo e mínimo dos módulos ligados em série e em paralelo não só permite que os valores da tensão e da corrente não ultrapassem os parâmetros de entrada do inversor, como também não ultrapassem os parâmetros dos próprios módulos. Para garantir o normal funcionamento do inversor é necessário garantir que cada fileira (*string*) possua o mesmo número de módulos.

3.3.2 Dimensionamento do inversor

Os inversores utilizados nas unidades fotovoltaicas de microprodução são os inversores DC/AC. Devido à existência no mercado de inversores específicos para unidades fotovoltaicas de microprodução, tal como está legislada no nosso país, este equipamento não é propriamente dimensionado para cada unidade fotovoltaica, mas é seleccionado dentro das opções existentes no mercado. É escolhido o inversor que melhor satisfaça as exigências da instalação, o mais adequado para a potência de saída desejada, embora o factor económico também seja decisivo na sua escolha. Como foi já referido anteriormente, a eficiência do inversor (η) é, igualmente, um parâmetro importante na sua selecção, pois estabelece a relação entre a potência de entrada e a potência de saída do inversor. Em geral os inversores apresentam a eficiências que variam entre 86% a 95%.

Para permitir o melhor funcionamento do inversor, este teria que trabalhar sempre com a sua maior eficiência, o que não é possível devido à variação do ponto de potência máxima (MPP) provocada essencialmente pela variação da radiação e pela variação da temperatura. Por causa dessa variação, “o dimensionamento do sistema deve ser feito de tal modo que o inversor não seja nem pouco utilizado nem subcarregado”, como refere Carvalho (2011).

Nas unidades fotovoltaicas de microprodução pretende-se que o inversor permaneça sempre em funcionamento. Quando é fornecida energia pelo gerador, deve-se estabelecer um rácio entre a potência do inversor e do gerador de 1:1, ou seja, a potência do gerador deve ser igual à potência de entrada do inversor ($P_{FV} = P_{inv}$; $FDI=1$).

Segundo Roriz (2010) e GREENPRO (2004) qualquer desvio do FDI deverá apresentar-se no intervalo dado pela equação 3.14:

$$0,7 \leq FDI \leq 1,2. \quad (3.14)$$

Outro critério importante na selecção do inversor relaciona-se com a potência de saída do inversor, visto que a legislação exige a potência de saída do inversor não ultrapasse os 50% da potência contratada a rede distribuição.

As suas características de entrada do inversor é um parâmetro importante pois este não deve ser desrespeitado, uma vez que tal pode pôr em causa o seu normal funcionamento. Por este motivo, o inversor influencia decisivamente na configuração da ligação dos módulos que constituem o gerador, de modo a obter as características de funcionamento que não estejam fora dos parâmetros de entrada do inversor. Na conjugação da ligação dos módulos deve-se garantir que a tensão e a corrente não ultrapassem os parâmetros de entrada do inversor. A soma das tensões dos módulos em série vai determinar a tensão de entrada do inversor. A soma das correntes das fileiras em série determina a corrente de entrada do inversor. Devido a temperatura do funcionamento módulos influenciar os níveis de tensão e de corrente, devendo-se ter em conta no cálculo da tensão e da corrente máxima.

3.3.3 Dimensionamento da cablagem

Como referido anteriormente, nas unidades fotovoltaicas de microprodução são utilizados três tipos de cabos com características diferentes. Isto porque existem diferentes intensidades de corrente e de tensão em cada percurso onde estes são aplicados. Os cabos dos módulos, como o próprio nome indica, permitem a ligação entre os módulos. Os cabos DC são utilizados para ligar da caixa de junções dos módulos até ao inversor. Os cabos AC são utilizados desde o inversor até à rede de distribuição.

A prevenção contra curto-circuitos nas aplicações de microprodução, provocadas por eventuais falhas de terra, passa pela opção de cabos unifilares, permitindo que os que possuem polaridades opostas sejam instalados separadamente. Na escolha dos cabos deve-se ter em consideração vários factores, tais como: influências externas, tensão, corrente e queda de tensão admissível. Caso os cabos estejam instalados a “céu aberto”, vão estar sujeitos a altas temperaturas, podendo mesmo chegar aos 70°C. Também estão sujeitos aos raios solares e aos UV. Por outro lado, caso os cabos não apresentem as devidas características para estarem instalados no exterior, devem ser canalizados.

O dimensionamento da secção dos cabos DC e AC, aplicados nas unidades fotovoltaicas de microprodução, segundo a Associação Certificadora de Instalações Eléctricas (Certie), não podem apresentar quedas de tensão superiores a 3%, sendo recomendável que a queda ronde 1%, como se pode verificar nas equações 3.16, 3.17 e 3.18 referentes ao dimensionamento dos cabos.

O dimensionamento dos cabos tem que satisfazer os requisitos das condições a que vão estar sujeitos, para tal a secção dos cabos é dada pelas equações 3.15 a 3.17.

Secção dos cabos de módulos:

$$S = \frac{(2L_M I_{FI})}{(\delta v)} \quad (3.15)$$

Secção dos cabos DC:

$$S = \frac{(2L_M I_{FI}^2)}{(1\% P_{FI V})} \quad (3.16)$$

Secção dos cabos AC:

$$S = \frac{(2V_{PPM} P_{FI})}{(1\% V^2_{PPM} \delta)} \quad (3.17)$$

3.3.4 Dimensionamento do sistema de protecção

Os elementos de protecção são utilizados, tal como o nome indica, para proteger os circuitos eléctricos e para proteger as pessoas. Podem interromper as ligações quando surgirem anomalias que poderão pôr em causa a segurança das pessoas e bens. Todavia também são implementados de forma a permitir a segurança em casos de necessidade de manutenção. Tal como os cabos, os elementos de protecção têm que ser dimensionados para cada unidade fotovoltaica de microprodução em particular. Os elementos utilizados para a protecção são os fusíveis, os disjuntores, os descarregadores atmosféricos, o disjuntor diferencial e o eléctrodo terra.

Fusíveis:

Os fusíveis, designados também por seccionadores, permitem a protecção das unidades fotovoltaicas de microprodução de sobreintensidades vindas da rede de distribuição. Estes dispositivos são seleccionados com base na secção dos cabos utilizados entre a portinhola e o contador, como refere Pinto (2004). A portinhola é ponto de ligação entre a unidade fotovoltaica e a rede de distribuição. A associação certificação de instalações eléctricas (Certiel) apresenta tabelas que permitem seleccionar, consoante a secção e o número de condutores, os fusíveis adequados. Estas tabelas encontram-se na Pinto (2004).

Disjuntores:

Os disjuntores permitem a protecção do circuito contra sobreintensidades. Além disso, são utilizados para efectuar manobras de manutenção. Estes dispositivos, como refere Pinto (2004), tal como os fusíveis, são dimensionados com base na secção dos cabos utilizados e o número de cabos. Assim como os fusíveis, estes dispositivos são seleccionados com base numa tabela disponibilizada pela em Pinto (2004), consoante a secção e o número de condutores.

Eléctrodo terra:

A ligação ao eléctrodo terra faz parte das medidas activas e passivas adoptadas nas unidades fotovoltaicas de microprodução. O eléctrodo terra consiste em enterrar no solo um conjunto de eléctrodos em anel ou em vareta de um material não corrosivo, como por exemplo o cobre, ferro galvanizado ou aço inoxidável, até alcançar a resistência mínima de 167 [ohm], como refere a Morais &Pereira (2007). A ligação das componentes metálicas e dos dispositivos de corte ao eléctrodo terra permite que as cargas indesejadas sejam desviadas sem danificar os equipamentos.

Descarregadores atmosféricos:

Estes dispositivos estabelecem a ligação dos cabos AC ao eléctrodo terra. O descarregador atmosférico deve apresentar a tensão mínima igual à tensão mínima do circuito aberto (CA) do gerador fotovoltaico, permitindo que no caso de surgimento de tensões acima das suportadas pelo circuito eléctrico, esta seja descarregada no eléctrodo terra.

Disjuntor diferencial:

O disjuntor diferencial, também designado por aparelho de corte bipolar, permite detectar a fuga da corrente procedendo a desconexão do circuito eléctrico, permitindo assim proteger as pessoas e bens. A sensibilidade do disjuntor diferencial é escolhida com base na resistência do eléctrodo terra, como refere Pinto (2004). Em Pinto (2004) apresenta uma tabela para a selecção do disjuntor e diferenciação baseia-se no valor alcançado pelo eléctrodo terra. O disjuntor diferencial de média sensibilidade nas instalações das unidades fotovoltaicas de microprodução pode chegar aos 300 mA, como refere a Certiel.

Os materiais utilizados nas unidades fotovoltaicas de microprodução para prevenir curto-circuitos nas aplicações originadas por eventuais falhas de terra, devem apresentar a classe II de isolamento.

3.3.5 Suportes

Como as unidades fotovoltaicas de microprodução têm uma variedade de locais onde podem ser instalados, isso exige a utilização de estruturas de suporte com características distintas. As condições a que os módulos fotovoltaicos vão estar expostos, o tipo de superfícies onde serão aplicados e as forças a que vão estar sujeitos, exigem que as estruturas de suporte sejam dimensionados tendo em conta as características próprias de cada aplicação.

3.3.6 Contador

O contador de energia, tal como o inversor, é uma componente que não é dimensionado para cada aplicação específica, mas sim, é seleccionado dentro das opções existentes no mercado. Estes têm que cumprir os requisitos impostos pela rede de distribuição e os requisitos de funcionamento, como a potência máxima que é debitada na rede pelo inversor.

3.3.7 Exemplo prático do dimensionamento de unidades fotovoltaicas de microprodução

Para a melhor compreensão do dimensionamento de uma unidade de microprodução foi efectuado o cálculo de quatro sistemas de microprodução fotovoltaica e a sua simulação em *software*. O dimensionamento dos quatro sistemas de microprodução fotovoltaica está de acordo com o exposto no subcapítulo referente ao dimensionamento. Após o dimensionamento e a simulação dos sistemas de microprodução fotovoltaica, são comparadas as diferentes configurações, assim como os resultados obtidos.

Os quatro sistemas de microprodução fotovoltaica são o resultado da conjugação de dois inversores, um da marca SMA (SB 3600TL-21) e o outro da marca Kaco (Powador 4400). Quanto aos módulos a utilizar, consideraram-se módulos, da marca Jinko (JKM230P-60) e da marca YGE (YL 230 P-29b). A combinação dos dois modelos de inversor e dos dois modelos de módulo, permite obter quatro configurações de sistemas de microprodução.

A escolha dos modelos dos inversores e dos módulos baseou-se na sua disponibilidade no mercado nacional.

As considerações estabelecidas para o dimensionamento dos quatro sistemas de microprodução fotovoltaico são enumeradas a seguir:

- O dimensionamento teve como ponto de partida que as unidades de microprodução se deveriam enquadrar no regime bonificado e, como tal, a potência máxima não deveria exceder 3,68 kW;
- O intervalo de temperatura de funcionamento dos módulos é de $-10 < ^\circ\text{C} < 70$;
- O local escolhido para o cálculo da produção de energia foi Lisboa. A radiação média diária em Lisboa considerada para efectuar os cálculos foi de $4,523 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$;
- O período considerado para os cálculos efectuados foi um ano;
- Adoptou-se um rácio entre a potência do gerador fotovoltaico e a potência do inversor próximo de 1:1, tal que a potência do gerador não ultrapasse a potência do inversor;

Os valores citados nas tabelas seguintes são referentes aos inversores e aos módulos utilizados nas quatro configurações, estas tabelas apresentam dados fornecidos pela ficha técnica dos próprios equipamentos a que fazem referência.

Tabela nº 3.1: Inversor: a) Kaco; b) SMA.

		Kaco (Powador 4400)				SMA (SB 3600TL-21)	
Entrada	Potência [W]	4400		Entrada	Potência [W]	3880	
	Gama de tensão MPP[V]	350-600			Gama de tensão MPP[V]	125-500	
	Tensão em vazio[V]	800			Tensão em vazio[V]	750	
	Corrente máxima[A]	12			Corrente máxima[A]	15	
Saída	Potência[W]	3680		Saída	Potência[W]	3680	
	Rendimento max[%]	96,5			Rendimento max[%]	97	
	Rendimento max[%]	95,9			Rendimento max[%]	96,1	

A tabela 3.1 permite comparar e identificar as diferenças entre os inversores utilizados no cálculo. Como se pode verificar, apesar destes dois inversores apresentarem a mesma potência nominal de saída, os valores de entrada são significativamente diferentes.

A tabela 3.2 permite comparar e identificar as diferenças entre os módulos utilizados no cálculo. Essas diferenças são pouco significativas, no entanto, se o sistema for implementado num local com maior gradiente térmico, como o desvio da tensão torna-se mais significativa com a variação da temperatura para o módulo YGE, quando comparado com o *Jinko*, pode-se concluir que o módulo mais adequado para locais mais quentes é o módulo da *Jinko*.

Tabela nº 3.2: Módulos: a) Jinko; b) YGE.

Jinko (JKM230P-60)		YGE (YL 230 P-29b)	
R. Módulos [%]	14,05	R. Módulos [%]	14,1
P [Wp]	230	P [Wp]	230
V _{MPP} [V]	29,6	V _{MPP} [V]	29,5
V _{CA} [V]	36,8	V _{CA} [V]	37
Temperatura [V _{CA}]	0,27%/°C	Temperatura [V _{CA}]	0,33%/°C
I _{MPP} [A]	7,78	I _{MPP} [A]	7,8
I _{cc} [A]	8,35	I _{cc} [A]	8,4

Apresentam-se de seguida os cálculos relativos ao dimensionamento do gerador solar para cada uma das quatro configurações

Configuração A:

A configuração A é constituída pelo inversor *kaco* (*Powador 4400*) e o módulo *Jinko* (JKM230P-60).

Para calcular a tensão máxima que ocorre no módulo em circuito aberto à menor temperatura de funcionamento, -10°C, utiliza-se a equação 3.7:

$$V_{CA} (\text{módulo a } -10^{\circ}\text{C}) = \left[1 + \frac{35 \times 0,27}{100} \right] \times 36,8 = 40,3[\text{V}]$$

O número máximo de módulos que podem ser ligados em série é dado pela equação 3.6:

$$N_{max} \leq \frac{800}{40,3} = 19,9 \sim 19$$

O número máximo de módulos ligados em série é 19.

Para calcular a tensão mínima que ocorre no módulo em curto-circuito à maior temperatura de funcionamento 70°C, é dada pela equação 3.10:

$$V_{MPP} (\text{módulo a } 70^{\circ}\text{C}) = \left[1 - \frac{45 \times 0,27}{100} \right] \times 29,6 = 26[\text{V}]$$

O número mínimo de módulos que podem ser ligados em série é dado pela equação 3.9:

$$N_{min} \geq \frac{350}{26} = 13,5 \sim 14$$

O número mínimo de módulos ligados em série é 14.

O número máximo de fileiras ligadas em paralelo é dado pela equação 3.12:

$$N_{fileira} \leq \frac{12}{7,78} = 1,54 \sim 1$$

O número máximo de fileiras ligadas em paralelo para esta configuração é 1.

O FDI é dado pela equação nº 3.13, e pretende-se que a potência do gerador seja o mais próximo da potência de entrada do inversor:

$$FDI = \frac{230 \times 19}{4400} = 0,993$$

Verifica-se o FDI se apresenta no intervalo dado pela equação 3.14:

$$0,7 < FDI = 0,993 < 1,2$$

Configuração B:

A configuração B é constituída pelo inversor *kaco* (*Powador 4400*) e o módulo YGE (YL 230 P-29b).

Da equação 3.7 obtêm-se a tensão máxima no módulo:

$$V_{CA}(\text{módulo a } -10^{\circ}\text{C}) = \left[1 + \frac{35 \times 0,33}{100}\right] \times 37 = 41,3 \text{ [V]}$$

Da equação 3.6 obtêm-se o número máximo de módulos que podem ser ligados em série:

$$N_{max} \leq \frac{800}{41,3} = 19,4 \sim 19$$

Da equação 3.10 obtêm-se tensão mínima no módulo:

$$V_{MPP}(\text{módulo a } 70^{\circ}\text{C}) = \left[1 - \frac{45 \times 0,33}{100}\right] \times 29,5 = 25,1 \text{ [V]}$$

O número mínimo de módulos que podem ser ligados em série é dado pela equação 3.9:

$$N_{min} \geq \frac{350}{25,1} = 13,9 \sim 14$$

Da equação 3.12 obtêm-se o número máximo de fileiras ligadas em paralelo:

$$N_{fileira} \leq \frac{12}{7,8} = 1,54 \sim 1$$

O FDI é dado pela equação 3.13:

$$FDI = \frac{230 \times 19}{4400} = 0,993$$

Da equação 3.14 resulta o FDI de:

$$0,7 < FDI = 0.993 < 1,2$$

Configuração C:

A configuração C é constituída pelo inversor SMA (SB 3600TL-21) e o módulo *Jinko* (JKM230P-60)

Da equação 3.7 obtêm-se a tensão máxima no módulo, que já foi calculada para a configuração A, a qual resultou V_{CA} (módulo a -10°C) = 40,3 [V].

Da equação 3.6 obtêm-se o número máximo de módulos que podem ser ligados em série:

$$N_{max} \leq \frac{750}{40,3} = 18,6 \sim 18$$

Da equação 3.10 obtêm-se tensão mínima no módulo, também calculado para a configuração A, do que resultou V_{MPP} (módulo a 70°C) = 26 [V].

O número mínimo de módulos que podem ser ligados em série é dado pela equação 3.9:

$$N_{min} \geq \frac{125}{26} = 4,8 \sim 5$$

Da equação 3.12 obtêm-se o número máximo de fileiras ligadas em paralelo:

$$N_{fileira} \leq \frac{15}{7,78} = 1,92 \sim 1$$

O FDI é dado pela equação 3.13, e fica:

$$FDI = \frac{230 \times 16}{3880} = 0,948$$

Da equação 3.14 resulta o FDI de:

$$0,7 < FDI = 0.948 < 1,2$$

Configuração D:

A configuração D é constituída pelo inversor SMA (SB 3600TL-21)) e o módulo YGE (YL 230 P-29b)

Da equação 3.7 obtêm-se a tensão máxima no módulo, que já foi calculada para a configuração B, da qual resultou $V_{CA} \text{ (módulo a } -10^{\circ}\text{C)} = 41,3 \text{ [V]}$.

Da equação 3.6 obtêm-se o número máximo de módulos que podem ser ligados em série:

$$N_{max} \leq \frac{750}{41,3} = 18,2 \sim 18$$

Da equação 3.10 obtêm-se tensão mínima no módulo, também calculada para a configuração B, do que resultou $V_{MPP} \text{ (módulo a } 70^{\circ}\text{C)} = 25,1 \text{ [V]}$.

Da equação nº 3.9 obtêm-se o número mínimo de módulos que podem ser ligados em série:

$$N_{min} \geq \frac{125}{25,1} = 4,98 \sim 5$$

Da equação nº 3.12 obtêm-se o número máximo de fileiras ligadas em paralelo:

$$N_{fileira} \leq \frac{15}{7,8} = 1,92 \sim 1$$

Da equação nº 3.13 resulta o FDI:

$$FDI = \frac{230 \times 16}{3880} = 0,948$$

Da equação nº 3.14 resulta o FDI de:

$$0,7 < FDI = 0.948 < 1,2$$

Como se pode verificar, as quatro configurações A, B, C e D estão dentro das tolerâncias do dimensionamento, podendo-se concluir que estas configurações satisfazem todos os requisitos do dimensionamento. É de notar que as configurações A e B são constituídas com 19 módulos e as configurações C e D são constituídas com 16 módulos, ambos em série.

A apresentação dos resultados das simulações e dos cálculos efectuados

Após efectuar os cálculos, foram realizadas duas simulações com o *software Powador PV-pilot (Expert Mode)* disponibilizado pela própria marca do inversor KACO. Também foram realizadas duas simulações com o *software Sunny Design* disponibilizado pela própria marca do inversor SMA. Nestes *softwares* foram seleccionados os mesmos componentes utilizados para os cálculos efectuados, permitindo assim a sua comparação. Os resultados obtidos das simulações são apresentados na tabela seguinte.

Tabela nº 3.3 Apresentação dos resultados dos cálculos e das simulações efectuadas referentes ao dimensionamento.

Dimensionamento de unidades fotovoltaicas de microprodução								
Configuração	A		B		C		D	
Inversor	Powador 4400 (Kaco)		Powador 4400 (Kaco)		SB 3600TL-21 (SMA)		SB 3600TL-21 (SMA)	
Módulo	JKM230P-60 (Jinko)		YL 230 P-29b (YGE)		JKM230P-60 (Jinko)		YL 230 P-29b (YGE)	
Dimensionamento	Simulação	Cálculo	Simulação	Cálculo	Simulação	Cálculo	Simulação	Cálculo
R. Módulos [%]	14,05		14,1		14,05		14,1	
Nº Módulos	19		19		16		16	
Área [m ²]	1,65*0,992		1,65*0,99		1,65*0,992		1,65*0,99	
P. Instalada [W]	19*230		19*230		16*230		16*230	
Série|Paralelo	19|1		19|1		19|1		19|1	
Radiação média anual [kWh/m ² /ano]	1593,00	1650,90	1593,00	1650,90	.....	1650,90	.....	1650,90
VMPP(-10°C)[V]	765,27	765,27	794,04	784,20	657,00	644,48	669,00	660,38
VMPP(70°C) [V]	494,07	494,07	467,18	477,27	386,00	416,00	373,00	401,91

Na tabela 3.3 encontram-se os resultados referentes aos cálculos efectuados acerca do dimensionamento, o resultado do cálculo das quatro configurações bem como as respectivas simulações. Os resultados encontram-se organizados por colunas segundo cada configuração, apresentando a azul os resultados da simulação e a cinzento o resultado dos cálculos efectuados para a mesma configuração.

Os *softwares* disponibilizados pela *Sunny Design (SMA)* e pela *Powador PV-pilot (Kaco)*, apresentaram-se de fácil acesso e de fácil manuseamento. Contudo, a simulação pelo *Sunny Design* não apresenta o valor da radiação adoptada nas simulações efectuadas, desencadeando diferenças nos resultados obtidos entre os cálculos efectuados e a simulação.

Os resultados dos cálculos efectuados apresentam-se um pouco diferentes dos obtidos nas simulações, apesar de ser pouco significativo. As diferenças surgem devido a radiação como as perdas consideradas nos cálculos são diferentes das perdas consideradas na simulação. Verificou-se também que do *software* da SMA resultaram diferenças na tensão máxima e mínima quando comparadas com os valores calculados. Tal ocorreu pois os diferentes valores presentes na ficha técnica do mesmo módulo apresentarem diferentes valores referentes ao desvio da tensão com a variação da temperatura (%/°C).

Quanto à potência instalada, a potência de entrada do inversor é o factor que mais se fez sentir no dimensionamento dos sistemas de microprodução fotovoltaicos. Para módulos com potência de 230Wp o inversor Kaco pode ligar 19 módulos, enquanto que o da SMA pode ligar 16 módulos, tal que a potência do gerador não ultrapasse a potência do inversor. As aplicações que apresentam maior potência de pico instalada são os sistemas que apresentam na sua constituição o inversor da Kaco.

3.4 Parâmetros de avaliação das unidades fotovoltaica de microprodução

Após referidos os tópicos de planeamento e dimensionamento de unidades fotovoltaicas de microprodução, pode fazer-se a estimativa da produção de energia. A produção é afectada por diversos factores, sendo os principais o desempenho do sistema e as condições do meio envolventes dos equipamentos.

Para se poder avaliar a qualidade da instalação ou mesmo para comparar diferentes unidades fotovoltaicas de microprodução, utilizam-se o Índice de Desempenho (ID) e o Factor de Produção (FP). Estes factores são muito usados nos programas disponíveis, visto serem independentes da localização das unidades fotovoltaicas de microprodução.

3.4.1 Índice de Desempenho (ID)

O Índice de Desempenho permite a comparação do desempenho de diferentes unidades fotovoltaicas de microprodução. Este factor resulta da divisão da energia realmente produzida pelo sistema (E_{real}) sobre a energia do mesmo sistema ideal (E_{ideal}), como se pode verificar na equação 3.18.

$$ID[\%] = \frac{E_{real}[kWh]}{E_{ideal}[kWh]} \quad (3.18)$$

O Índice de Desempenho estabelece a relação entre a energia injectada na rede de distribuição pela unidade fotovoltaica e a energia ideal produzida pela mesma unidade fotovoltaica. Se se tratar de um sistema perfeito, o ID é igual a 100%, contudo, como os sistemas reais apresentam perdas devido à temperatura, perdas no inversor, perdas do gerador, perdas dos cabos, etc., este valor apresenta-se, na generalidade das aplicações, entre 70% a 85%.

3.4.2 Factor de Produção (FP)

O Factor de Produção também permite comparar entre diferentes unidades fotovoltaicas de microprodução. Resulta da divisão da energia real produzida pelo sistema (E_{real}) pela potência de pico instalada (P_{FV}), como se pode verificar na equação 3.19.

$$FP\left[\frac{kWh}{kWp}\right] = \frac{E_{real}[kWh]}{P_{FV}[kWp]} \quad (3.19)$$

O Factor de Produção permite relacionar a energia produzida por cada W instalado. Varia tanto com a localização como também com a eficiência do sistema

Energia produzida pelo sistema ideal (E_{ideal}):

A energia realmente produzida (E_{ideal}) pelas unidades fotovoltaicas de microprodução resulta do produto da área do gerador, do número de horas de sol equivalente e da eficiência dos módulos. O cálculo da energia ideal não tem em conta as perdas dos sistemas reais, tais como perdas no cabo, no gerador, no inversor e sistemas de protecção. Energia ideal das unidades fotovoltaicas é calculada com base na equação 3.20.

$$E_{ideal}[\text{kWh}] = A_{gerador}[\text{m}^2] \times H_{eq}[\text{kWh}/\text{m}^2] \times \eta_{Módulo}[\%] \quad (3.20)$$

Energia produzida pelo sistema real (E_{real}):

A energia produzida pelo sistema real (E_{real}) pode ser estimada após conhecer as características do meio envolvente do sistema. Esta estimativa toma em conta vários factores que prejudicam a produção de energia do sistema. Após conhecer o local da instalação, podem ser quantificadas as perdas referentes à temperatura, ao inversor, do gerador, da acumulação de poeiras nos módulos, as perdas nos cabos, etc.. Também poderão ser consideradas outras perdas existentes no sistema. A energia real produzida pelo sistema (E_{real}), dada na equação 3.21, permitirá calcular os índices ID e FP e comparar diferentes sistemas fotovoltaicos.

$$E_{real}[\text{kWh}] = E_{ideal}[\text{kWh}] \times \eta_{inversor}[\%] \times \eta_{cabos}[\%] \times \eta_{gerador}[\%] \times \eta_{Temp.}[\%] \quad (3.21)$$

A energia real produzida pelas unidades fotovoltaicas apresenta-se sempre abaixo da energia ideal da unidade fotovoltaica.

3.4.3 Exemplo prático do cálculo dos parâmetros de avaliação das unidades fotovoltaicas de microprodução

Para melhor compreender o cálculo da estimativa de produção, é dada continuidade ao exemplo prático introduzido na secção do dimensionamento, anteriormente apresentada. O cálculo dos parâmetros de avaliação permite a comparação das diferentes unidades fotovoltaicas de microprodução. Posteriormente os parâmetros obtidos são com os valores provenientes da aplicação do software de cada um dos inversores.

As considerações estabelecidas para o cálculo da estimativa de produção das quatro configurações de sistemas de microprodução fotovoltaico são:

- Os módulos fotovoltaicos encontram-se instalados numa estrutura fixa, com a radiação equivalente para Lisboa, segundo Macêdo, W. (2006), de $H_{eq} = 4,523$ kWh/m²;
- Nos cálculos efectuados foram consideradas as seguintes perdas: nos cabos: 1%; no gerador: 5%; térmicas: 5,8%;
- A remuneração estabelecida para a venda da energia produzida é a que vigora no corrente ano de 2013 para os primeiros 8 nos do regime bonificado, que é de € 0,196 por kWh;
- As considerações estabelecidas para o dimensionamento permanecem válidas, uma vez que se trata da continuação do exercício do dimensionamento.

Configuração A:

Para calcular a produção ideal de energia emprega-se a equação 3.20, resultando:

$$E_{ideal} = 19 \times 1,65 \times 0,992 \times 4,523 \times 0,1405 \times 365 = 7213,48 \text{ [kWh]}$$

O cálculo da produção real obtida por esta configuração ao longo de um ano é dado pela equação 3.21:

$$E_{real} = 19 \times 1,65 \times 0,992 \times 4,523 \times 365 \times 0,1405 \times 0,965 \times 0,99 \times 0,95 \times 0,942 = 6091,86 \text{ [kWh]}$$

O sistema de microprodução fotovoltaico produz anualmente de 6091,86 kWh de energia eléctrica, incluindo perdas dos módulos, do inversor, do gerador, dos cabos e provocadas pela temperatura. Como é de esperar, a produção de energia na situação ideal é superior à produzida na situação real.

Um dos factores utilizados para comparar os sistemas de microprodução é o Índice de Desempenho (ID), que é calculado pela equação 3.18:

$$ID = \frac{6091,86}{7213,48} = 84,45 \text{ [%]}$$

Outro factor utilizado para comparar diferentes sistemas de microprodução é o Factor de Produção, calculado pela equação 3.19:

$$FP[\%] = \frac{6091,86}{19 \times 230} = 1,396 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kWp}} \right]$$

Configuração B:

Da equação 3.20 resulta a energia ideal produzida:

$$E_{ideal} = 19 \times 1,65 \times 0,99 \times 4,523 \times 0,141 \times 365 = 7224,56 \text{ [kWh]}$$

Da equação 3.21 resulta a energia real produzida:

$$E_{real} = 19 \times 1,65 \times 0,99 \times 4,523 \times 365 \times 0,141 \times 0,965 \times 0,99 \times 0,95 \times 0,942 = 6101,21 \text{ [kWh]}$$

Da equação 3.18 resulta o Índice de Desempenho:

$$ID = \frac{6101,21}{7224,56} = 84,45 \text{ [%]}$$

E da equação 3.19 resulta o Factor de Produção de:

$$FP[\%] = \frac{6101,21}{19 \times 230} = 1,396 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kWp}} \right]$$

Configuração C:

Da equação 3.20 resulta a energia ideal produzida:

$$E_{ideal} = 16 \times 1,65 \times 0,99 \times 4,523 \times 0,141 \times 365 = 6074,51 \text{ [kWh]}$$

Da equação 3.21 resulta a energia real produzida:

$$E_{real} = 16 \times 1,65 \times 0,99 \times 4,523 \times 365 \times 0,141 \times 0,97 \times 0,99 \times 0,95 \times 0,942 = 5156,57 \text{ [kWh]}$$

Da equação 3.18 resulta o Índice de Desempenho:

$$ID = \frac{5156,57}{6074,51} = 84,89 \text{ [%]}$$

Da equação 3.19 resulta o Factor de Produção:

$$FP[\%] = \frac{5156,57}{16 \times 230} = 1,401 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kWp}} \right]$$

Configuração D:

Da equação 3.20 resulta a energia ideal produzida:

$$E_{ideal} = 16 \times 1,65 \times 0,99 \times 4,523 \times 0,141 \times 365 = 6083,83 \text{ [kWh]}$$

Da equação 3.21 resulta a energia real produzida:

$$E_{\text{real}} = 16 \times 1,65 \times 0,992 \times 4,523 \times 365 \times 0,1405 \times 0,965 \times 0,99 \times 0,95 \times 0,942 = 5164,48 \text{ [kWh]}$$

Da equação 3.18 resulta o Índice de Desempenho:

$$ID = \frac{5164,48}{6083,83} = 84,89 \text{ [%]}$$

Da equação nº 3.19 resulta o Factor de Produção:

$$FP[\%] = \frac{5164,48}{16 \times 230} = 1,403 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kWp}} \right]$$

A apresentação dos resultados das simulações e dos cálculos efectuados

Da simulação efectuada para o dimensionamento também se obtiveram os resultados referentes às estimativas de produção, das quais resultaram os valores apresentados na tabela nº 3.4.

Tabela nº 3.4: Apresentação dos resultados dos cálculos e das simulações efectuadas referente aos parâmetros de produção.

Parâmetros de avaliação das unidades fotovoltaicas de microprodução								
Configuração	A		B		C		D	
Inversor	Powador 4400 (Kaco)		Powador 4400 (Kaco)		SB 3600TL-21 (SMA)		SB 3600TL-21 (SMA)	
Módulo	JKM230P-60 (Jinko)		YL 230 P-29b (YGE)		JKM230P-60 (Jinko)		YL 230 P-29b (YGE)	
	Simulação	Cálculo	Simulação	Cálculo	Simulação	Cálculo	Simulação	Cálculo
Energia ideal produzida [kWh]	.....	7213,48	.....	7239,15	.....	6074,51	.....	6096,13
Energia real produzida [kWh]	6262,00	6091,86	6158,00	6101,21	5586,60	5156,57	5538,50	5164,48
Índice de desempenho [%]	83,45	84,45	81,99	84,45	84,30	84,89	85,30	84,89
Fator de produção [kWh/kWp]	1,43	1,39	1,41	1,40	1,52	1,40	1,51	1,40
Euros ano [€]	1227,35	1194,00	1206,97	1195,84	1206,97	1010,69	1085,55	1012,24

Na tabela 3.4 encontram-se os resultados referentes aos cálculos efectuados sobre as estimativas de produção para as quatro configurações propostas e respectivas simulações. Os resultados encontram-se organizados por colunas segundo cada configuração, apresentando a azul a simulação e a cinzento os cálculos efectuados para a mesma configuração.

Como as configurações A e B são constituídas com maior número de módulos, apresentam maior potência de pico instalada e originam maior energia convertida ao longo de um ano. A obtenção de maior energia convertida permite obter maiores remunerações. Apesar da diferença ser diminuta, a configuração A apresenta a maior produção comparativamente com as restantes configurações.

Após a análise dos resultados do dimensionamento dos diferentes sistemas, verificou-se que aqueles que apresentam maior retorno financeiro, não apresentam necessariamente maior índice de desempenho, dado que o gerador fotovoltaico é constituído por diferentes potências. Como e de prever os geradores que apresentam maior potência de pico instalada apresentam maiores conversões de energia para períodos equivalentes.

Para compreender melhor a análise, os resultados estão apresentados sob forma de gráfico de barras nas figuras 3.13 e 3.14.

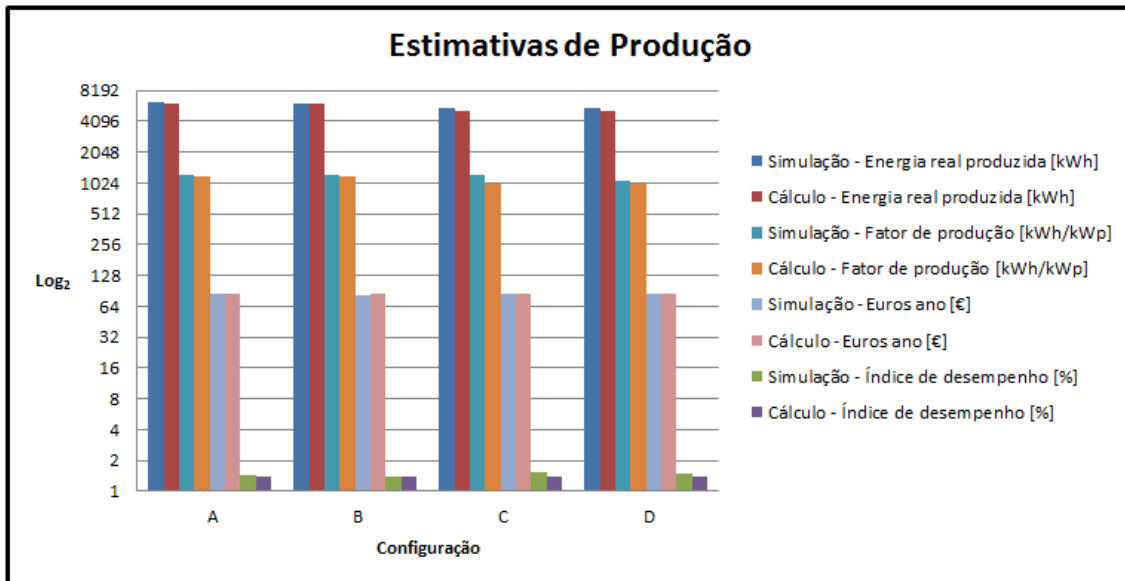


Figura nº 3.13: Apresentação dos resultados dos cálculos e das simulações efectuadas referente às estimativas de produção.

Os resultados da figura 3.13 apresentam-se numa escala logarítmica de base 2, o que permite melhor visualização dos valores obtidos nas diferentes configurações. Em cada configuração apresenta-se sucessivamente os valores referentes aos cálculos e a simulação.

Como se pode verificar na figura 3.14, os resultados da simulação seguem a mesma perspectiva que os resultados dos cálculos efectuados.

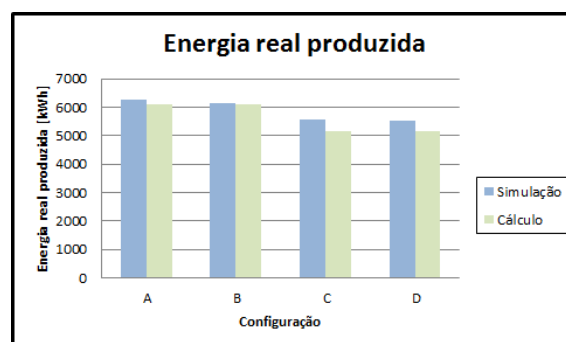


Figura nº 3.14: Comparação da energia real produzida calculada e obtida pelas simulações para as quatro configurações propostas.

No dimensionamento dos diferentes sistemas de microprodução fotovoltaico, o que apresenta maior retorno financeiro é o sistema constituído pelo inversor da Kaco com módulo da YGE (configuração B), visto que permite obter maior produção de energia. Apesar disso, a configuração A apresentam retorno financeiro muito próximo da configuração B, uma vez que apresenta uma produção de energia anual apenas ligeiramente inferior. Estas diferenças, apesar de serem pouco significativas para um período de um ano, poderão ser significativas se considerarmos o período de vida útil destes equipamentos, a rondar os 20 anos.

3.5 Factores prejudiciais ao funcionamento de uma unidade fotovoltaica de microprodução

Existem diversos factores que afectam o normal funcionamento das unidades fotovoltaicas de microprodução, todavia estes podem ser colmatados ou minimizados. Os factores fazem-se reflectir significativamente na diminuição da eficiência global do sistema, por isso devem ser evitados. Factores como o aumento da temperatura, a acumulação de poeiras, o mau posicionamento, o sombreamento, as deficientes ligações de contactos ou factores relacionados com a rede de distribuição afectam o normal funcionamento das unidades fotovoltaicas de microprodução. Eles têm que ser levados em consideração tanto na fase de projecto como também na vida útil dos equipamentos, de modo que estes permaneçam a funcionar nas devidas condições.

3.5.1 Sombreamento

O sombreamento de células ou dos módulos pode ter consequências prejudiciais no funcionamento no gerador fotovoltaico, podendo mesmo tornar os módulos obsoletos, caso as protecções não estejam bem dimensionadas e instaladas. Factores como a acumulação de neve, a acumulação de poeiras, os obstáculos do meio envolvente (chaminés, árvores, etc.) provocam o sombreamento das células e dos módulos, e, conseqüentemente a diminuição da eficiência do gerador fotovoltaico. Deve-se, sempre que possível, optar por soluções que evitem o sombreamento e promovam a autolimpeza dos módulos. Soluções como a instalação dos módulos inclinados, que, para além de promover a absorção da radiação, evitam a acumulação de sujidades na superfície dos módulos fotovoltaicos.

No caso de sombreamento de módulos que constituem o gerador, os díodos de desvio e os díodos de fileira permite o desvio da corrente, evitando que esta tenha que passar pelos módulos sombreados, não afectando significativamente o funcionamento do gerador fotovoltaico, como referido no tópico dos dispositivos de protecção.

Quanto à possibilidade de deposição de neve nos módulos é relevante instalar os módulos inclinados em coluna, permitindo minimizar o número de módulos afectados pelo sombreamento como se verifica na figura 3.15.

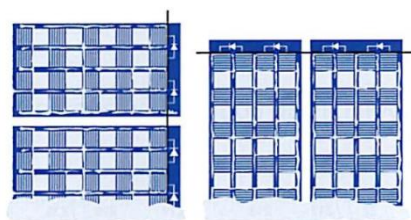


Figura nº 3.15: Disposição dos módulos relativamente a neve: a) Paralelamente; b) Perpendicular. (Fonte: Morais (2009))

3.5.2 Temperatura

O aumento da temperatura reflecte-se na diminuição da tensão das células fotovoltaicas, alterando a eficiência das mesmas. Contudo, o efeito da temperatura reflecte-se mais significativamente nas células de silício monocristalino e policristalinas do que nas de silício amorfo, como se pode ver figura 3.16. O aumento da temperatura dar-se-á essencialmente devido a perdas por Joule das resistências internas das células, devido à radiação que não é convertida em corrente ou devido ao meio envolvente do gerador fotovoltaico.

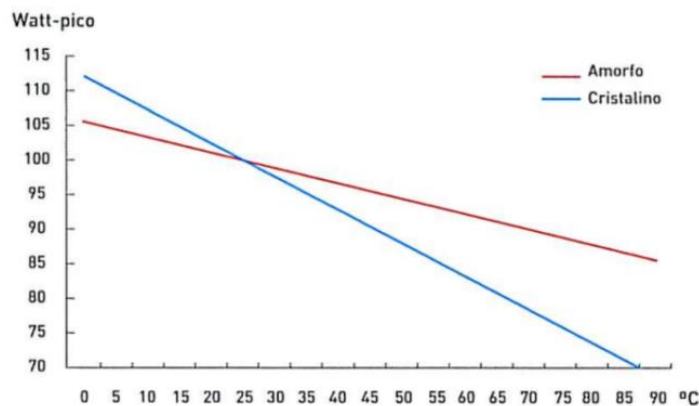


Figura nº 3.16: Curvas característica potência em função da temperatura dos módulos. (Fonte: Morais (2009))

Com a instalação dos módulos fotovoltaicos inclinados e aplicados em pontos mais altos, possibilita-se que estes sejam arrefecidos com a convecção natural ou pelo vento (ver figura 3.17), podendo melhorar de forma significativa o seu desempenho.

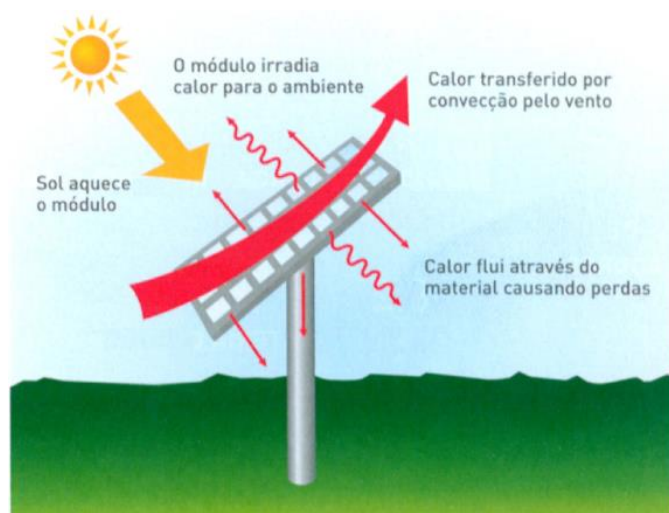


Figura nº 3.17: Efeito da convecção nos módulos FV. (Fonte: Morais (2009))

3.5.3 Interferência da rede

Os inversores DC/AC são equipamentos electromagnéticos utilizados para converter a corrente contínua (DC) gerada pelo gerador fotovoltaico em corrente alternada (AC), de forma que a energia possa ser injectada na rede de distribuição. Os inversores utilizados nas unidades fotovoltaicas de microprodução utilizam a tensão eléctrica da rede, à qual estão conectados, como referência para ajustar os parâmetros da energia gerada, com a mesma amplitude, frequência e em fase com a energia que circula na rede. Devido à comutação do inversor, este apresenta harmónicos significativos que tem pouco significado na corrente e na tensão de saída, apresentando as características próximas da onda sinusoidal. Os certificados exigidos na aplicação do inversor estão sobre critérios apertados, permitindo, assim, garantir, de acordo com o pretendido, que o inversor DC/AC não interfira significativamente na rede de distribuição de energia eléctrica. No entanto, a falta da tensão na rede, ou as anomalias presentes nesta, originam a desconexão do inversor da rede, interferindo na eficiência das unidades fotovoltaicas de microprodução, como refere JUNIOR (2010).

A rede de distribuição tem como função fazer chegar a energia do fornecedor ao consumidor com as devidas características. Os prejuízos económicos resultantes da má qualidade de energia que circula na rede podem ser muito elevados, e, por isso, a questão da qualidade da energia eléctrica entregue aos consumidores finais é objecto de grande preocupação, sobretudo com o aumento das ligações à rede eléctrica. A energia que circula na rede é caracterizada pela frequência, pela tensão, pelo factor de potência e pela corrente sinusoidal, que estão regulamentados no Regulamento da Rede de Distribuição. Contudo, existem inúmeros factores que provocam efeitos indesejados na energia que circula na rede de distribuição. Estes efeitos causam regularmente interferências na rede, tais como harmónicos, lacunas, baixo factor de potência, ruído na linha, sobretensões, subtensões e apagões, fazendo com que a qualidade da energia que circula na rede não se apresente nos intervalos parametrizados. Os factores que interferem na qualidade da energia que circula na rede podem ser provocados pelo meio ambiente, pelas exigências da energia requerida à rede ou mesmo pelos fornecedores de energia, como refere no documento publicado pela Aplicações Tecnológicas.

As descargas atmosféricas são factores que o ser humano não pode controlar, embora existam meios que permitem minimizar os seus efeitos. Estima-se que as trovoadas provoquem cerca de 100 raios a cada segundo, no mundo. Estas provocam um impulso de corrente que chega a alcançar dezenas de milhares de amperes, provocando incêndios, destruição de equipamentos, para além de apresentarem um verdadeiro perigo para o ser humano. Também provocam regularmente apagões ou sobretensões indesejadas nas redes de distribuição, como refere no documento o mesmo documento.

As exigências da energia requeridas à rede de distribuição são muito instantâneas, fazendo com que a energia sofra constantemente perturbações que colocam em causa os parâmetros estipulados da energia que circula na rede de distribuição. Embora de a rede limitar a potência requerida pelos consumidores, ocorrem sempre subtensões, lacunas, harmónicos e alteração do factor de potência.¹

3.6 Instalação e manutenção de uma unidade fotovoltaica de microprodução

Com a globalização do mercado, existe cada vez uma maior variedade de equipamentos que podem ser utilizados nas unidades fotovoltaicas de microprodução, pois estes possuem variados requisitos e pontos de aplicação. Apesar de estes equipamentos apresentarem-se no mercado com instruções, especificações, documentos técnicos, tal nem sempre é o suficiente para serem entendidas, cabendo ao instalador com a sua experiência e conhecimentos garantir a sua adequada aplicação.

A Instalação dos equipamentos utilizados nas unidades fotovoltaicas de microprodução deve realizar-se por mão-de-obra especializada, de modo a evitar erros na instalação e tornar o processo mais rápido, sem que ponham em causa a segurança das pessoas e bens. Como foi já referido existe legislação específica que obriga que a instalação de uma unidade fotovoltaica de microprodução seja executada por entidades que possuam alvará para esse fim.

Ao iniciar a instalação dos componentes de uma unidade fotovoltaica de microprodução, têm que ser tomadas medidas e procedimentos que garantam a segurança das pessoas e bens, evitando qualquer tipo de incidentes. Estes procedimentos devem ser previstos na fase de planeamento, juntamente com a requisição de materiais, equipamentos e ferramentas necessárias para a aplicação da unidade fotovoltaica de microprodução, como refere GTES (2004).

Para que não haja ocorrência de imprevistos na execução da instalação e no funcionamento de unidades fotovoltaicas de microprodução, os procedimentos devem ser executados segundo um plano, onde constem os passos a efectuar, as técnicas de execução e os equipamentos necessários. Na execução toma-se sempre necessário ter em conta factores como os procedimentos de segurança, o cumprimento das regras referentes à instalação eléctrica em vigor e os módulos, que devem apresentar-se cobertos para evitar choques eléctricos na sua implementação.

¹ Significado das perturbações ocorridas na rede estão em anexo.

3.6.1 Instalação do inversor

O inversor faz a conexão entre a rede de distribuição e o gerador fotovoltaico, visto que é este que converte a corrente contínua gerada pelo gerador fotovoltaico em corrente alternada, para que esta possa ser injectada na rede. A entrada do inversor está ligada ao gerador fotovoltaico, que gera energia em forma de corrente contínua (DC), e a saída do inversor está ligada ao contador de produção de energia, para que este contabilize a energia eléctrica em forma de corrente alternada (CA) que é injectada na rede de distribuição.

Uma das soluções adoptadas na instalação do inversor que permite menores perdas no funcionamento das unidades fotovoltaicas de microprodução passa por instalar o inversor tão próximo quanto possível do gerador fotovoltaico, visto que as perdas ocorridas nos condutores DC são mais elevadas que as ocorridas nos condutores AC, permitindo, assim, diminuir as perdas resultantes nos cabos.

O inversor, além de ter como principal função converter a corrente contínua em corrente alternada, também desempenha funções de protecção. Este permite proteger a rede de anomalias vindas do gerador fotovoltaico. Caso existam falhas na rede, e os valores não se apresentarem nos parâmetros estabelecidos cabe ao inversor a desconexão automática da unidade fotovoltaica de microprodução da rede de distribuição.

Os inversores utilizados nas unidades fotovoltaicas de microprodução segundo as exigências da rede de distribuição devem apresentar o certificado reconhecido pela mesma, na qual apresente o adequado grau de protecção (IP ou IK), garantindo, assim, que estes dispositivos apresentem as devidas características de protecção e funcionamento. Estes certificados dão garantia que o inversor injecta na rede energia com as devidas características de tensão, frequência e factor de potência. Adicionalmente garante a segurança das pessoas e bens.

3.6.2 Instalação dos módulos

A posição em que são instalados os módulos fotovoltaicos é determinante na produção das unidades fotovoltaicas de microprodução. Os módulos devem ser posicionados de modo a maximizar-se a exposição directa à luz solar ao longo do ano, a maximizar-se o seu arrefecimento por ventilação natural e a serem evitados sombreamentos, acumulação de sujidade, de neve ou de gelo na superfície dos módulos.

A generalidade das aplicações são fixas, visto os sistemas móveis necessitarem de maior investimento e maior manutenção, apesar de estes chegarem a aumentar até 30% da energia produzida num ano, quando comparadas com sistemas fixos.

Nas aplicações fixas, o posicionamento mais adequado não só está condicionado pelas características da área disponível, como também pela região onde a unidade fotovoltaica de microprodução é implementada. No entanto, visto tratar-se de aplicações cuja energia gerada é toda injectada na rede eléctrica, o posicionamento deve ir ao encontro da maior produção de energia anual. Para maximizar essa produção de energia, em Portugal, os módulos devem estar orientados para o Sul geográfico com uma inclinação próxima de trinta e cinco graus ($\alpha=35^\circ$). Este posicionamento permite que os módulos obtenham melhores resultados na Primavera, Verão e Outono, uma vez que é neste período que há a maior intensidade solar.

Todavia, factores como, por exemplo, o sombreamento ou a ocorrência de neblina durante as horas de maior incidência de radiação relacionadas com as características de cada local, devem ser tidas em conta, podendo, nesses casos, privilegiar-se a geração nalguma hora específica do dia, tal que se possa obter a maior conversão de energia. Sempre que possível o gerador fotovoltaico deverá ser instalado em locais suficientemente distantes de objectos que possam provocar sombras nas horas aptas para conversão (usualmente entre as 10 e as 14 horas quando há a maior incidência de radiação).

Os invólucros dos módulos fotovoltaicos têm que estar ligadas ao eléctrodo terra por um cabo de secção mínima de 4 mm², como refere a Pinto (2004). A ligação dos módulos a eléctrodo terra permite a proteger os equipamentos de descargas atmosféricas ou mesmo de algum defeito de isolamento.

3.6.3 Instalação da estrutura de suporte dos módulos

Existe uma grande diversidade de áreas nas quais são instalados os geradores fotovoltaicos, existindo, por isso, diferentes soluções em função de cada caso particular. As unidades fotovoltaicas de microprodução têm que ser instaladas em locais onde exista já compra de energia `rede. Por isso os geradores são aplicados, muitas das vezes, nos telhados, visto estes possuírem áreas suficientes para instalar a potência desejada, e, assim, evita-se a utilização de espaços úteis para outros fins. No entanto, nem sempre os telhados permitem a instalação do gerador fotovoltaico, pois este pode não possuir as devidas características, como a orientação desejada, a inclinação pretendida ou a área suficiente. Nestes casos será necessário instalar o sistema noutra área disponível, como o jardim, as paredes etc., exigindo-se diferentes soluções quanto aos suportes para os módulos fotovoltaicos.

Todas as estruturas que são utilizadas para a instalação dos módulos fotovoltaicos têm que ser dimensionadas segundo as especificidades de cada aplicação, com a finalidade de permitir que os módulos tenham a inclinação adequada, estável e ventilada, conferindo aos módulos um bom desempenho. Os suportes devem apresentar-se leves, estáveis, resistentes, de montagem fácil e de fácil manutenção. Tal como os elementos metálicos dos módulos, os elementos metálicos que constituem a estrutura de suporte para os módulos fotovoltaicos devem ser interligados entre si e ao eléctrodo terra por um cabo terra de secção mínima de 4 mm², permitindo que, em caso de anomalias no isolamento ou mesmo em caso de descargas atmosféricas, sejam descarregadas directamente na terra, assegurando assim, a integridade dos equipamentos.

Distância entre fileiras de módulos fotovoltaico em superfície horizontais

A instalação de fileiras de módulos fotovoltaicos em locais planos deve ser feita tal que estes fiquem afastados entre si o suficiente para não se sobreporem nas horas correspondentes ao seu funcionamento, evitando, assim, o sombreamento. A distância necessária a estabelecer para que não ocorra o sombreamento entre essas fileiras de módulos fotovoltaicos é dada pela equação 3.22 de acordo com a figura 3.18:

$$d = L \times \left(\cos\alpha + \frac{\sin\alpha}{\tan\beta} \right) \quad (3.22)$$

A distância entre as fileiras de módulos (d) relaciona o comprimento dos módulos (L), a inclinação dos módulos (α) e o ângulo mínimo efectuado do percurso efectuado pelo sol no inverso (β), evitando que nas horas de produção de energia das unidades fotovoltaicas as fileiras se sobreponham e provoquem sombreamento.

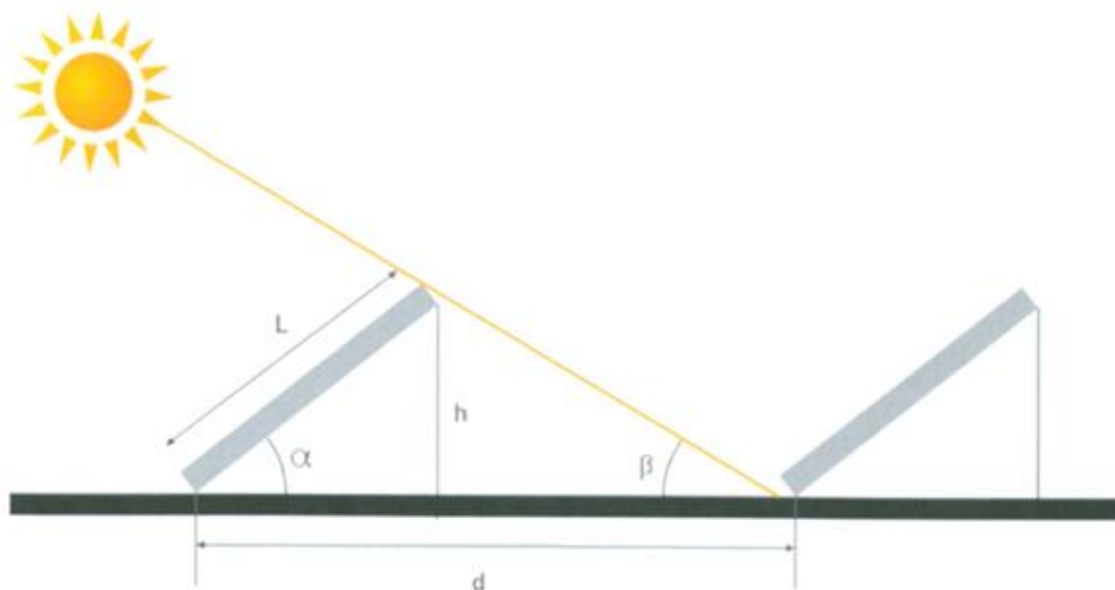


Figura nº 3.18: Análise da distância entre fileiras. (Fonte: Morais (2009))

3.6.4 Instalação do sistema de protecção

Os elementos de protecção têm como função tanto assegurar o normal funcionamento dos equipamentos, bem como estabelecer a segurança das pessoas e bens durante o tempo de vida útil das unidades fotovoltaicas de microprodução. Estes devem ser instalados no circuito fotovoltaico, de modo a poder isolar as interferências e proteger os elementos que constituem uma unidade fotovoltaica de microprodução. Os componentes utilizados para a protecção das unidades fotovoltaicas de microprodução são: os fusíveis; os disjuntores; o disjuntor diferencial; os descarregadores atmosféricos e o eléctrodo terra.

Para poder proteger as unidades fotovoltaicas de microprodução das interferências vindas da rede de distribuição, são instaladas, entre a rede e o disjuntor, um fusível por fase. A instalação destes elementos permite, no caso da rede se apresentar em sobrecarga, isolar as unidades fotovoltaicas de microprodução da mesma. Estas componentes são instaladas num quadro, com o adequado grau de IP ou IK, perto da portinhola e do contador. Neste quadro deve-se também apresentar, além dos elementos já referidos, a ligação à terra da protecção de massas, como refere Pinto (2004).

À saída do inversor são instalados, por fase, um descarregador atmosférico, um disjuntor e um disjuntor diferencial. Cabe a estes dispositivos proteger o circuito desde o inversor até à rede de distribuição, de interferências do gerador ou de descargas atmosféricas.

O eléctrodo terra deve possibilitar a ligação de todos os elementos activos e passivos que constituem uma unidade fotovoltaica de microprodução. Este dispositivo permite que caso ocorram sobrecargas, estas sejam encaminhadas para o eléctrodo terra, permitindo que estas se dissipem.

Os elementos de protecção são instalados em quadros e devem apresentar um certificado pela CE, de classe II de isolamento, a indicação do IP e do IK, o tipo de quadro, a marca e o fabricante, segundo a Morais & Pereira (2007). Estes invólucros são próprios para instalações com componentes activas, permitindo o isolamento do exterior. O manuseamento destes equipamentos deve ser realizado por pessoas instruídas para o efeito, visto que são necessários cuidados e ferramentas adequadas.

Os códigos IP e IK traduzem o grau de protecção contra a penetração de corpos sólidos e a protecção contra penetração de líquidos, segundo Morais & Pereira (2007).

3.6.5 Instalação do contador

Como já foi mencionado, o contador é o dispositivo que procede à contagem da energia eléctrica produzida no sistema de microprodução. Este dispositivo eléctrico está localizado geralmente na origem da instalação eléctrica a uma altura entre 1 m e 1,7 m do pavimento, como refere Pinto (2004). O contador é instalado entre a rede e o inversor, apresentando entre estes os seccionadores AC. O contador tem que ser instalado num lugar acessível pela via pública, para que, quando necessário, se possa proceder à leitura dos valores contidos neste dispositivo.

3.6.6 Instalação da cablagem

Os cabos têm como função fechar o circuito, permitindo assim que os elementos que constituem uma unidade fotovoltaica de microprodução funcionem como um todo. Na instalação dos cabos deve ter-se em especial atenção a adequada ligação dos elementos, uma vez que um erro de ligação pode comprometer o normal funcionamento dos elementos.

Nas unidades fotovoltaicas de microprodução são utilizados cabos unifilares no circuito DC, ou seja, na ligação dos módulos ao inversor. O uso destes cabos permite instalar separadamente as diferentes polaridades, evitando que, em caso de sobrecargas no sistema, causem curto-circuito (CC), por causa da incapacidade do isolante, responsáveis por originar incêndios. As ligações dos cabos devem seguir a mesma filosofia, mantendo separados os cabos nas caixas de junções.

Em toda a instalação, os condutores utilizados devem estar devidamente identificados pelo código de cores referentes às polaridades dos cabos. Estes também têm que apresentar as características próprias para suportar, não só as cargas, como também as características exteriores a que vão estar expostos, como a luz solar, os raios ultravioletas, humidades, como refere GTES (2004). No caso de os cabos não possuírem essas características que permitem que possam estar sujeitos às influências exteriores, devem então ser canalizados, permitindo, assim, a sua protecção mecânica e a sua fixação. Os condutores devem estar de acordo com a Norma Portuguesa (NP) ou Norma Europeia (NE), apresentando as devidas características de influência e as condições a que estão sujeitos, como refere Pinto (2004).

Apresenta-se na figura 3.19 um exemplo de um esquema de ligação de uma unidade de microprodução fotovoltaica onde constam os principais equipamentos que a constituem.

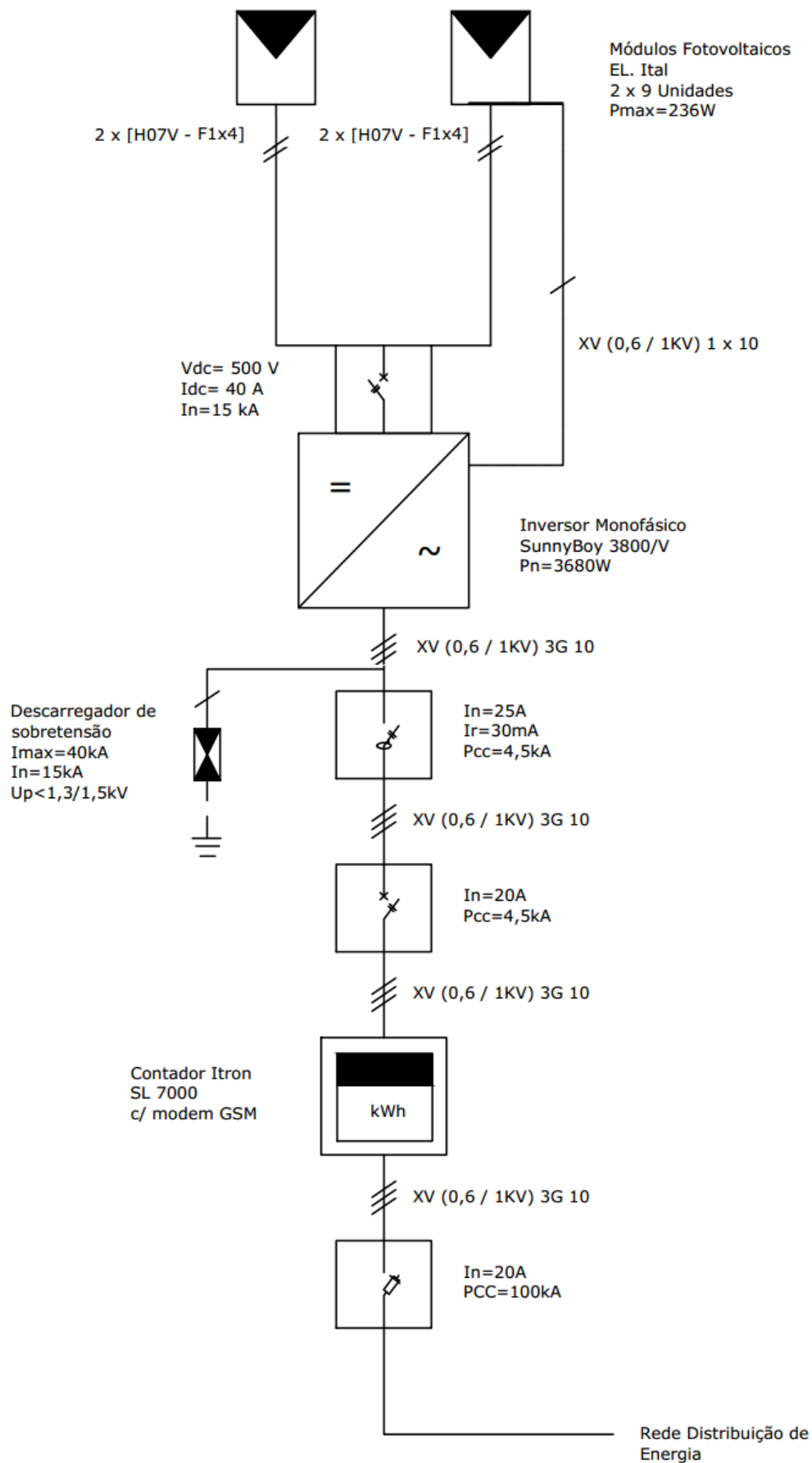


Figura nº 3.19: Circuito eléctrico de uma unidade fotovoltaica de microprodução. (Fonte: Solar Earth, Lda.)

3.7 Manutenção

Todo o projecto, bem como os equipamentos utilizadas nas unidades fotovoltaicas de microprodução são concebidas com o intuito de minimizar os trabalhos de manutenção. Desse modo, reduzem-se as necessidades de efectuar qualquer manutenção de rotina na maioria das instalações de unidades fotovoltaicas de microprodução. No entanto, é aconselhável realizar inspecções periódicas que permitam acompanhar a produção, verificando se surge alguma irregularidade ou anomalia no sistema. Desta forma, podem ser adoptados procedimentos para corrigir de forma eficaz os mesmos, sem que seja posta em causa a integridade dos equipamentos ou a segurança das pessoas. Em suma, estas acções de inspecção permitem aplicar a manutenção preventiva, evitando problemas futuros.

Actualmente existem inversores utilizados nas unidades fotovoltaicas de microprodução que permitem guardar os dados referentes à produção de energia, permitindo ao operador aquando das inspecções, verificar de forma plausível o funcionamento do equipamento.

Nas manutenções realizadas às unidades fotovoltaicas de microprodução deve-se verificar a integridade dos equipamentos bem como das ligações entre eles. Deve-se também proceder a manobras de limpeza dos equipamentos, como a superfície dos módulos exposta à radiação solar, visto o lixo presente no vidro frontal diminuir significativamente a radiação directa incidente nas células, prejudicando directamente a produção de energia. A limpeza dos vidros dos módulos pode ser efectuada com utensílios comerciais comuns para a limpeza de vidros, que removam poeira, sujidade, e outros detritos, ao mesmo tempo que evita que este seja arranhado. Nos dias em que o tempo estiver claro e com poucas nuvens, os módulos deverão ser limpos preferencialmente no início da manhã ou no final da tarde, de forma a evitar que possíveis choques térmicos danifiquem o material de cobertura do módulo.

Devem, igualmente, ser verificadas as condições do meio envolvente, visto poderem ocorrer mudanças que perturbem o bom funcionamento da unidade, como no caso de jardins que apresentem árvores ou plantas cujo crescimento possa causar sombreamento aos módulos

Uma limpeza do inversor somente é necessária se a dissipação do calor for afectada. As alhetas e os ventiladores devem permanecer limpos e não possuir qualquer objecto que limite a sua refrigeração. No caso da necessidade da limpeza do inversor, este deve ser limpo com um pano pouco húmido ou mesmo seco, sem se utilizar solventes, produtos abrasivos ou substâncias utilizadas na limpeza doméstica.

Se surgirem anomalias ou danos nos materiais, nas inspecções efectuadas, a manutenção deverá ser efectuada por pessoas qualificadas, que estejam habilitadas e habituados a lidar com os problemas das unidades fotovoltaicas de microprodução, permitindo, assim, que o problema não se agrave ou mesmo que não volte a ocorrer.

3.8 Nota conclusiva

Neste capítulo foram descritas as principais características dos equipamentos que constituem uma unidade fotovoltaica de microprodução, bem como o seu funcionamento. Foram abordados aspectos técnicos referentes ao planeamento, dimensionamento, implementação e manutenção das unidades fotovoltaicas. A abordagem de parâmetros de avaliação, análise e comparação das unidades fotovoltaicas de microprodução permite quantificar o desempenho das unidades fotovoltaicas.

A abordagem dos parâmetros que quantificam o desempenho de unidades fotovoltaicas de microprodução permite no capítulo seguinte fazer a análise de 23 unidades fotovoltaicas de microprodução em pleno funcionamento.

Capítulo 4

4 Análise de unidades fotovoltaicas de microprodução em pleno funcionamento

O capítulo que agora se inicia tem como objectivos apresentar e discutir dados relativos a unidades fotovoltaicas de microprodução em pleno funcionamento. São caracterizadas 23 unidades fotovoltaicas de microprodução, as quais são analisadas e avaliadas quanto ao seu desempenho. O estudo realizado tem como objectivo obter resultados que permitam tirar conclusões que possam vir a contribuir para a melhoria de futuros projectos deste sector.

4.1 Caracterização das unidades fotovoltaicas de microprodução estudadas

Os dados referentes às unidades fotovoltaicas de microprodução em análise foram disponibilizados pela empresa Solar Earth, Lda. Referem-se a um conjunto de 23 unidades localizadas, na sua globalidade, no concelho da Covilhã.

Para melhor compreensão das características referentes às unidades fotovoltaicas de microprodução estas são apresentadas nas tabelas seguintes. Cada unidade fotovoltaica de microprodução apresenta características distintas merecendo uma especial atenção na sua análise. Das unidades analisadas, 14 delas apresentam os módulos fotovoltaicos instalados sobre estruturas fixas, pelo que passarão a designar-se por unidades de microprodução fixas. Nas restantes 9, os módulos apresentam-se instalados sobre seguidores solares, com um ou dois eixos, razão pela qual passarão a ser designadas por unidades de microprodução com seguimento. O registo da energia total produzida nas unidades fotovoltaicas de microprodução foi realizado nas duas últimas semanas de Setembro de 2013.

Assim, as tabelas seguintes caracterizam as 23 unidades fotovoltaicas de microprodução. Estas encontram-se ordenadas por ordem temporal de ligação à rede, fazendo-se a apresentação da mais antiga para a mais recente. Cada tabela é referente a uma única unidade fotovoltaica de microprodução.

Tabela nº 4.1: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº1.

Designação		Unidade 1
Localização		Aveiro
Potência de ligação		3,45 kW
Módulos	Designação	CSI-CS6A-180 (Canadian Solar)
	Quantidade	20
	Células	Silício Microcristalino
Inversor		Kaco Powador 3501 xi (Kaco)
Gerador Solar	Fixo	No telhado
		Inclinação (α) = 30°
		Orientação (ϕ) = 0°
Data de ligação		17 Fevereiro de 2009
Energia produzida total		23384 kWh
Incidências: I1: Interruptor diferencial desligado durante 1 mês.		

Tabela nº 4.2: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº2.

Designação		Unidade 2
Localização		Meia Léguas - Covilhã
Potência de ligação		3,68 kW
Módulos	Designação	CSI-CS6A-180 (Canadian Solar)
	Quantidade	24
	Células	Silício Microcristalino
Inversor		Sunny Boy 3800 V (SMA)
Gerador Solar	Fixo	No telhado
		Inclinação (α) = 20°
		Orientação (ϕ) = -45°
Data de ligação		18 Agosto de 2009
Energia produzida total		24930 kWh
Incidências: Não há registo.		

Tabela nº 4.3: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº3.

Designação		Unidade 3
Localização		Teixoso - Covilhã
Potência de ligação		3,68 kW
Módulos	Designação	CRM180 (Chaori Solar)
	Quantidade	24
	Células	Silício Microcristalino
Inversor		Sunny Boy 3800 V (SMA)
Gerador Solar	Seguidor solar	Número de seguidores: 2
		Número de eixos: 1
Data de ligação		19 Janeiro de 2010
Energia produzida total		29700 kWh
Incidências: I1: Um seguidor parado devido a avaria no motor durante 1 mês. I2: Sistema inoperacional devido à queima de um fusível durante 15 dias.		

Tabela nº 4.4: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº4.

Designação		Unidade 4
Localização		São Domingos - Castelo Branco
Potência de ligação		3,68 kW
Módulos	Designação	CRM 180 (Chaori Solar)
	Quantidade	24
	Células	Silício Microcristalino
Inversor		Sunny Boy 3800 V (SMA)
Gerador Solar	Seguidor solar	Número de seguidores:2
		Número de eixos: 1
Data de ligação		23 Março de 2010
Energia produzida total		27446 kWh
Incidências: I1: Um seguidor parado devido a avaria do motor durante 1 semana. I2: Um seguidor parado devido a avaria do motor durante 1 semana.		

Tabela nº 4.5: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº5.

Designação		Unidade 5
Localização		Paul - Covilhã
Potência de ligação		3,68 kW
Módulos	Designação	CRM 185 (Chaori Solar)
	Quantidade	24
	Células	Silício Microcristalino
Inversor		Sunny Boy 3800 V (SMA)
Gerador Solar	Fixo	No telhado
		Inclinação (α) = 30°
		Orientação (ϕ) = -30°
Data de ligação		24 Março de 2010
Energia produzida total		20468 kWh
Incidências: Não há registo.		

Tabela nº 4.6: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº6.

Designação		Unidade 6
Localização		Paul - Covilhã
Potência de ligação		3,68 kW
Módulos	Designação	CRM 185 (Chaori Solar)
	Quantidade	24
	Células	Silício Microcristalino
Inversor		Sunny Boy 3800 V (SMA)
Gerador Solar	Fixo	No telhado
		Inclinação (α) = 30°
		Orientação (ϕ) = 0°
Data de ligação		25 Março de 2010
Energia produzida total		22437 kWh
Incidências: Não há registo.		

Tabela nº 4.7: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº7.

Designação		Unidade 7
Localização		Paul - Covilhã
Potência de ligação		3,45 kW
Módulos	Designação	CRM 185 (Chaori Solar)
	Quantidade	20
	Células	Silício Microcristalino
Inversor		Sunny Boy 3300 (SMA)
Gerador Solar	Seguidor solar	Número de seguidores:2
		Número de eixos: 1
Data de ligação		31 Março de 2010
Energia produzida total		24007 kWh
Incidências: Não há registo.		

Tabela nº 4.8: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº8.

Designação		Unidade 8
Localização		Ferro - Covilhã
Potência de ligação		3,68 kW
Módulos	Designação	STP 180S (Suntech)
	Quantidade	24
	Células	Silício Microcristalino
Inversor		Sunny Boy 3800 v (SMA)
Gerador Solar	Seguidor solar	Número de seguidores:2
		Número de eixos: 1
Data de ligação		7 Maio de 2010
Energia produzida total		26145 kWh
Incidências: I1: Inversor com conexão irregular à rede durante 2 meses. I2: Um seguidor parado devido a avaria no motor durante 2 semanas.		

Tabela nº 4.9: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº9.

Designação		Unidade 9
Localização		Paul - Covilhã
Potência de ligação		3,45 kW
Módulos	Designação	TSM 220 (Trina Solar)
	Quantidade	20
	Células	Silício Microcristalino
Inversor		Kaco Powador 3600 xi (Kaco)
Gerador Solar	Seguidor solar	Número de seguidores:2
		Número de eixos: 1
Data de ligação		20 Julho de 2010
Energia produzida total		25405 kWh
Incidências: Não há registo.		

Tabela nº 4.10: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº10.

Designação		Unidade 10
Localização		Caria - Belmonte
Potência de ligação		3,68 kW
Módulos	Designação	TSM 180 DCI (Trina Solar)
	Quantidade	24
	Células	Silício Microcristalino
Inversor		Kaco Powador 3600 xi (Kaco)
Gerador Solar		Seguidor solar
		Número de seguidores:2 Número de eixos: 1
Data de ligação		13 Maio de 2011
Energia produzida total		21393kWh
Incidências: I1:Inversor avariado durante 8 dias.		

Tabela nº 4.11: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº11.

Designação		Unidade 11
Localização		Covilhã
Potência de ligação		3,45 kW
Módulos	Designação	CSI-CS6P-220P (Canadian Solar)
	Quantidade	18
	Células	Silício Policristalino
Inversor		Kaco Powador 3600 xi (Kaco)
Gerador Solar		Fixo
		No telhado
		Inclinação (α) = 17° Orientação (ϕ) = 0°
Data de ligação		19 Julho de 2011
Energia produzida total		13558 kWh
Incidências: Não há registo.		

Tabela nº 4.12: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº12.

Designação		Unidade 12
Localização		Paul - Covilhã
Potência de ligação		3,68 kW
Módulos	Designação	TSM 180 (Trina Solar)
	Quantidade	24
	Células	Silício Microcristalino
Inversor		Kaco Powador 3600 xi (Kaco)
Gerador Solar		Seguidor solar
		Número de seguidores:2 Número de eixos: 1
Data de ligação		19 Julho de 2011
Energia produzida total		17028 kWh
Incidências: I1: Um seguidor parado devido a avaria no motor durante 1 semana. I2: Um seguidor parado devido a avaria no motor durante 1 semana. I3: Um seguidor parado devido a avaria no motor durante 1 semana. I4: Um seguidor parado devido a avaria no motor durante 1 semana. I5: Um seguidor parado devido a avaria no motor durante 1 semana.		

Tabela nº 4.13: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº13.

Designação		Unidade 13
Localização		Silvares - Castelo Branco
Potência de ligação		3,68 kW
Módulos	Designação	CSI-CS6P-240P (Canadian Solar)
	Quantidade	18
	Células	Silício Policristalino
Inversor		Kaco Powador 3600 xi (Kaco)
Gerador Solar	Seguidor solar	Número de seguidores:2
		Número de eixos: 2
Data de ligação		11 Agosto de 2011
Energia produzida total		14366 kWh
Incidências: I1: Um seguidor parado devido a avaria no motor durante 4 semanas. I2: Um seguidor parado devido a avaria no motor durante 4 semanas. I3: Um seguidor parado devido a avaria no motor durante 6 semanas.		

Tabela nº 4.14: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº14.

Designação		Unidade 14
Localização		Tortosendo - Covilhã
Potência de ligação		3,45 kW
Módulos	Designação	ES-E215 (Evergreen Solar)
	Quantidade	18
	Células	Silício Policristalino
Inversor		Kaco Powador 3600 xi (Kaco)
Gerador Solar	Fixo	No telhado
		Inclinação (α) = 20°
		Orientação (ϕ) = -45°
Data de ligação		19 Setembro de 2011
Energia produzida total		10530 kWh
Incidências: I1: Interruptor diferencial desligado durante 2 semanas.		

Tabela nº 4.15: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº15.

Designação		Unidade 15
Localização		Paul - Covilhã
Potência de ligação		3,45 kW
Módulos	Designação	CSI-CS6P-230P (Canadian Solar)
	Quantidade	18
	Células	Silício Policristalino
Inversor		Kaco Powador 3600 xi (Kaco)
Gerador Solar	Seguidor solar	Número de seguidores:1
		Número de eixos: 2
Data de ligação		17 Novembro de 2011
Energia produzida total		15992 kWh
Incidências: Não há registo.		

Tabela nº 4.16: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº16.

Designação		Unidade 16
Localização		Covilhã
Potência de ligação		3,45 kW
Módulos	Designação	CNPV-250 (Dongying Potovoltaic Company)
	Quantidade	16
	Células	Silício Monocristalino
Inversor		Kaco Powador 3600 xi (Kaco)
Gerador Solar	Fixo	No telhado
		Inclinação (α) = 20°
		Orientação (ϕ) = +20°
Data de ligação		23 Novembro de 2011
Energia produzida total		10661 kWh
Incidências: 11: Nos primeiros 2 meses houve sombreamento parcial entre módulos.		

Tabela nº 4.17: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº17.

Designação		Unidade 17
Localização		Paul - Covilhã
Potência de ligação		3,68 kW
Módulos	Designação	CSI-CS6P-240P (Canadian Solar)
	Quantidade	18
	Células	Silício Policristalino
Inversor		Kaco Powador 3600 xi (Kaco)
Gerador Solar	Fixo	No telhado
		Inclinação (α) = 25°
		Orientação (ϕ) = +10°
Data de ligação		3 Janeiro de 2012
Energia produzida total		11840 kWh
Incidências: Não há registo.		

Tabela nº 4.18: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº18.

Designação		Unidade 18
Localização		Covilhã
Potência de ligação		3,45 kW
Módulos	Designação	CNPV-250M (Dongying Potovoltaic Company)
	Quantidade	16
	Células	Silício Monocristalino
Inversor		Kaco Powador 4200 (Kaco)
Gerador Solar	Fixo	No telhado
		Inclinação (α) = 20°
		Orientação (ϕ) = -45°
Data de ligação		9 Janeiro de 2012
Energia produzida total		10366 kWh
Incidências: Não há registo.		

Tabela nº 4.19: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº19.

Designação		Unidade 19
Localização		Tortosendo - Covilhã
Potência de ligação		3,45 kW
Módulos	Designação	JKM 240P (Jinko Solar)
	Quantidade	18
	Células	Silício Policristalino
Inversor		Kaco Powador 4200 (Kaco)
Gerador Solar	Fixo	No telhado
		Inclinação (α) = 30°
		Orientação (ϕ) = 0°
Data de ligação		17 Junho de 2012
Energia produzida total		7553 kWh
Incidências: Não há registo.		

Tabela nº 4.20: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº20.

Designação		Unidade 20
Localização		São Vicente da Beira - Castelo Branco
Potência de ligação		3,45 kW
Módulos	Designação	JKM 260M-96 (Jinko Solar)
	Quantidade	16
	Células	Silício Monocristalino
Inversor		Kaco Powador 4200 (Kaco)
Gerador Solar	Fixo	No telhado
		Inclinação (α) = 25°
		Orientação (ϕ) = 0°
Data de ligação		4 Setembro de 2012
Energia produzida total		5130 kWh
Incidências: Não há registo.		

Tabela nº 4.21: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº21.

Designação		Unidade 21
Localização		São Domingos - Castelo Branco
Potência de ligação		3,45 kW
Módulos	Designação	JKM 260M-96 - Jinko Solar
	Quantidade	16
	Células	Silício Monocristalino
Inversor		Kaco Powador 4200 - Kaco
Gerador Solar	Fixo	No telhado
		Inclinação (α) = 15°
		Orientação (ϕ) = -45°
Data de ligação		23 Outubro de 2012
Energia produzida total		5771 kWh
Incidências: Não há registo.		

Tabela nº 4.22: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº22.

Designação		Unidade 22
Localização		Ferro - Covilhã
Potência de ligação		3,45 kW
Módulos	Designação	YL245P-29V (Yingli Solar)
	Quantidade	18
	Células	Silício Monocristalino
Inversor		Kaco Powador 4200 (Kaco)
Gerador Solar	Fixo	No chão
		Inclinação (α) = 15°
		Orientação (ϕ) = 0°
Data de ligação		3 Agosto de 2013
Energia produzida total		752 kWh
Incidências: I1: Inversor com conexão irregular à rede durante 2 meses.		

Tabela nº 4.23: Características gerais da unidade fotovoltaica de microprodução nº23.

Designação		Unidade 23
Localização		Covilhã
Potência de ligação		3,45 kW
Módulos	Designação	TSM 245 PC/PA05 (Trina Solar)
	Quantidade	19
	Células	Silício Policristalino
Inversor		Kaco Powador 4200 (Kaco)
Gerador Solar	Fixo	No telhado
		Inclinação (α) = 20°
		Orientação (ϕ) = 0°
Data de ligação		4 Setembro de 2013
Energia produzida total		517 kWh
Incidências: Não há registo.		

4.2 Comparação e análise das unidades fotovoltaicas de microprodução estudadas

A energia produzida nas unidades fotovoltaicas de microprodução é um dos principais parâmetros a ser avaliado, uma vez que representa o principal objectivo de uma unidade desta natureza. Adicionalmente é a partir deste parâmetro que se calculam alguns dos restantes parâmetros de avaliação do desempenho das unidades de microprodução fotovoltaica.

Para poder perceber-se a razão das diferenças registadas na energia produzida pelas unidades fotovoltaicas de microprodução analisadas, apresentam-se agrupadas, na tabela 4.24, as suas principais características

Tabela nº 4.24: Características das unidades fotovoltaicas de microprodução em estudo.

Unidade fotovoltaica de microprodução	Inversor				Módulos					Unidade de microprodução		
										Fixo		Com seguimento
	Marca	Eficiência η (%)	P_{in} (kW)	P_{out} (kW)	Células	Área (m ²)	Quantidade	Eficiência (%)	Potência (Wp)	Orientação (ϕ)	Inclinação (α)	Número de eixos
1	Kaco	93,3%	4	3,45	M	1,30	20	13,8	180	0	30	
2	SMA	94,7%	4,04	3,68	M	1,30	24	13,8	180	-45	20	
3	SMA	94,7%	4,04	3,68	M	1,28	24	14,1	180			1
4	SNA	94,7%	4,04	3,68	M	1,30	24	14,1	180			1
5	SMA	94,7%	4,04	3,68	M	1,28	24	14,5	185	-30	30	
6	SMA	94,7%	4,04	3,68	M	1,28	24	14,5	185	0	30	
7	SMA	94,4%	3,82	3,45	M	1,28	20	14,5	185			1
8	Kaco	94,7%	4,04	3,68	M	1,28	24	14,1	180			1
9	Kaco	95,8%	3,6	3,45	M	1,64	20	13,4	220			1
10	Kaco	95,8%	3,6	3,68	M	1,28	24	14,1	180			1
11	Kaco	95,8%	3,6	3,45	P	1,61	18	13,7	220	0	17	
12	Kaco	95,8%	3,6	3,68	M	1,28	24	14,1	180			1
13	Kaco	95,8%	3,6	3,68	P	1,61	18	14,3	240			2
14	Kaco	95,8%	3,6	3,45	P	1,64	18	13,2	215	-45	20	
15	Kaco	95,8%	3,6	3,45	P	1,61	18	14,0	230			2
16	Kaco	95,8%	3,6	3,45	M	1,64	16	15,3	250	20	20	
17	Kaco	95,8%	3,6	3,68	P	1,61	18	14,3	240	10	25	
18	Kaco	95,8%	4,2	3,45	M	1,64	16	15,6	250	-45	20	
19	Kaco	95,8%	4,2	3,45	P	1,64	18	14,7	240	0	30	
20	Kaco	95,8%	4,2	3,45	M	1,70	16	15,3	260	0	25	
21	Kaco	95,8%	4,2	3,45	M	1,70	18	15,3	260	-45	15	
22	Kaco	95,8%	4,2	3,45	M	1,64	18	15,0	245	0	15	
23	Kaco	95,8%	4,2	3,45	P	1,55	19	15,0	245	0	20	

Uma análise breve à tabela permite concluir que, de entre os inversores aplicados, os que apresentam maior eficiência de conversão são da marca alemã *KACO New Energy GmbH*. Também se verifica que as unidades fotovoltaicas de microprodução mais recentes apresentam maiores potências de pico, como é o caso das unidades 21 e 23, em que a potência instalada está acima de 4,65 kWp.

O número de módulos que constitui o gerador fotovoltaico tem diminuído ao longo do tempo, para a mesma potência instalada, visto que a potência por módulo tem aumentado significativamente. Este facto está relacionado com a melhoria da eficiência dos módulos fotovoltaicos, dado igualmente observável na tabela. Na tabela nº 4.25 são apresentados dados relativos ao funcionamento das unidades de microprodução.

Tabela nº 4.25: Dados relativos ao funcionamento das unidades fotovoltaicas de microprodução em estudo.

Unidades de microprodução fotovoltaica	Número de dias de funcionamento	Energia total produzida (kWh)	Média diária da energia produzida		Incidências	
			Fixas (kWh/dia)	Com seguimento (kWh/dia)	Quantidade	Dias de paragem
1	1659	23384	14,1		1	31
2	1478	24930	16,9		0	0
3	1327	29700		22,4	2	46
4	1263	27446		21,7	2	14
5	1262	20468	16,2		0	0
6	1261	22437	17,8		0	0
7	1256	24007		19,1	0	0
8	1191	26145		22,0	1	76
9	1146	25405		22,2	0	0
10	829	21393		25,8	1	8
11	787	13558	17,2		0	0
12	787	17028		21,6	5	70
13	759	14366		18,9	3	98
14	727	10530	14,5		1	14
15	669	15992		23,9		
16	663	10661	16,1			
17	623	11840	19,0			
18	617	10366	16,8			
19	459	7553	16,5			
20	373	5130	13,8			
21	333	5771	17,3			
22	47	752	16,0			
23	22	517	23,5			
Média			16,8	22,0		

Do período de funcionamento das unidades fotovoltaicas de microprodução verifica-se que as três últimas unidades 21, 22 e 23 apresentam um período de funcionamento inferior a 1 ano, originando valores que merecem especial atenção.

4.2.1 Energia produzida pelas unidades de microprodução

Como foi já referido anteriormente, no estudo do desempenho de uma unidade de microprodução fotovoltaica tem particular interesse a análise da energia total produzida ao longo do seu período de funcionamento. Assim, apresenta-se na figura nº 4.1 um gráfico com a energia produzida em cada uma das unidades estudadas.

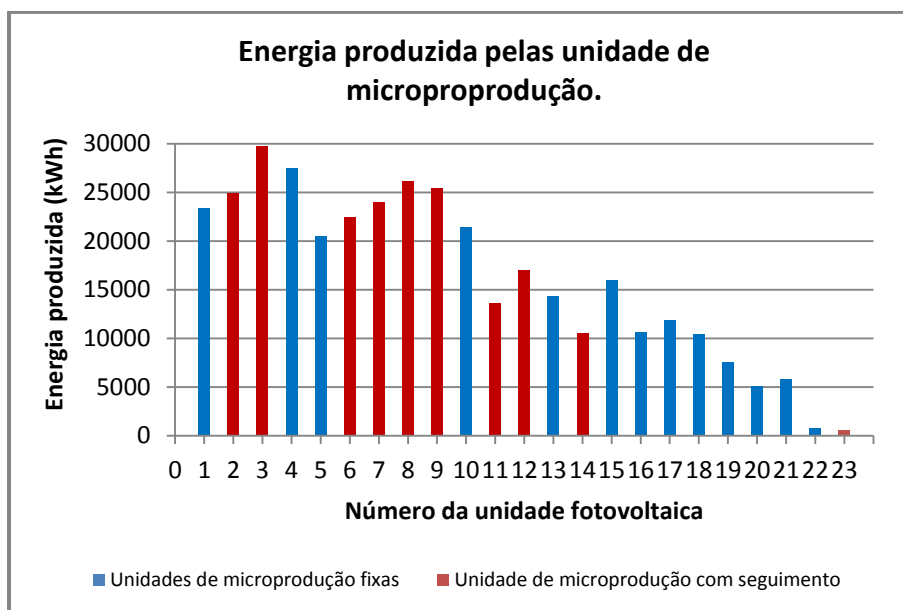


Figura nº 4.1: Energia produzida pelas unidades fotovoltaicas de microprodução em estudo.

A análise ao gráfico permite observar que, tal como seria espectável, em traços gerais as unidades mais recentes apresentam menores quantidades de energia total produzida. No entanto, verifica-se que este comportamento não é completamente linear. Devido às características particulares de cada unidade fotovoltaica de microprodução, surgem padrões de produção distintos entre estas, observando-se oscilações na energia total produzida entre unidades fotovoltaicas com períodos equivalentes de funcionamento.

Como se verifica igualmente na figura nº 4.1 as unidades de microprodução com seguimento solar, apresentadas a vermelho, apresentam sempre maior produção de energia, para o mesmo período de funcionamento, que as unidades de microprodução fixas, apresentadas a azul.

Com base na energia total produzida e no período de funcionamento de cada uma das unidades, foi calculada a média diária da energia produzida. Este parâmetro é apresentado no gráfico da figura nº 4.2.

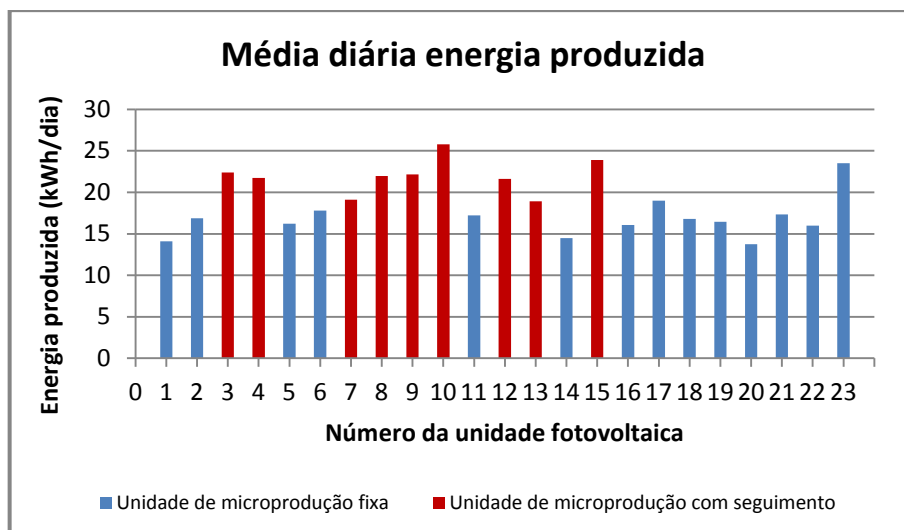


Figura nº 4.2: Média de energia produzida pelas unidades fotovoltaicas de microprodução em estudo.

Da análise do gráfico pode concluir-se que, tal como se esperaria, as unidades com seguimento solar apresentam em geral maior produção diária que as unidades fixas. Não confirmam esta regra as unidades 13 e 23, com seguimento e fixa, respectivamente. Adicionalmente, e comparativamente com as unidades fotovoltaicas fixas, as unidades fotovoltaicas com seguimento apresentam em média mais 23% de energia diária produzida.

Uma análise particular às unidades com seguimento mostra que as que apresentam melhor resultado são as unidades 10 e 15. Embora a unidade 15 se diferencie pelo facto de corresponder a uma estrutura com seguimento de dois eixos. Por outro lado, analisando em particular as unidades fixas, observa-se que as que apresentam melhor resultado são as unidades fotovoltaicas 17 e 23, embora os resultados obtidos na unidade 23 se devam ao facto desta apresentar um período de funcionamento de apenas 22 dias. Por fim, cerca de 56% das unidades fotovoltaicas com seguimento solar apresentam-se acima da média de energia diária produzida, enquanto para as unidades fotovoltaicas fixas esse valor é de 43%.

4.2.2 Incidências ocorridas durante o período de funcionamento das unidades

Com o objectivo de contribuir na análise do desempenho das unidades fotovoltaicas de microprodução analisadas, recolheu-se igualmente informação relativa às incidências, ou anomalias, ocorridas durante o funcionamento das unidades. Recolheram-se, adicionalmente, os correspondentes períodos de paragem até à resolução da anomalia e entrada em funcionamento da unidade. Na figura nº 4.3 apresentam-se as incidências relativas à totalidade das unidades fotovoltaicas.

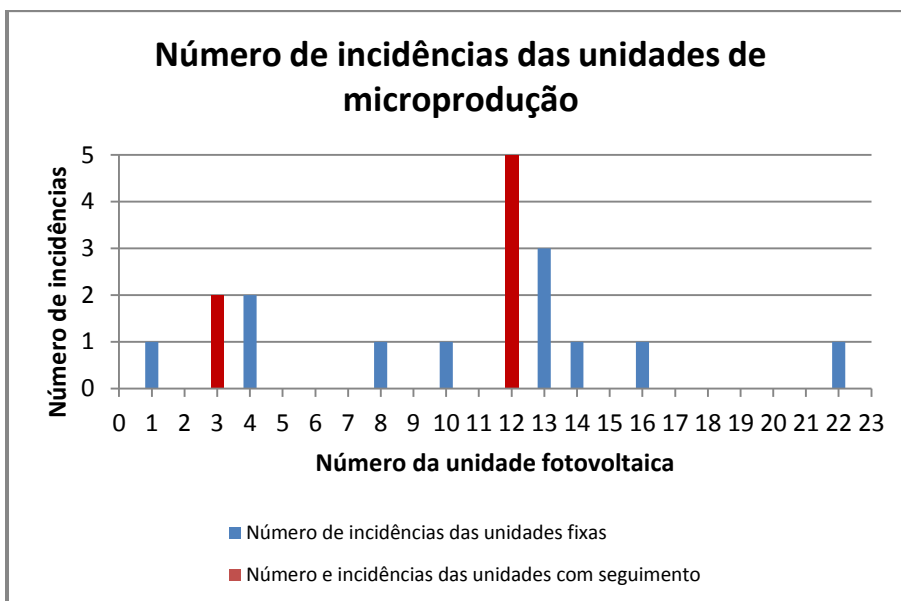


Figura nº 4.3: Número de incidências das unidades fotovoltaicas.

O que se observa da figura é que as unidades fotovoltaicas com seguimento apresentam maior número de incidências que as unidades fixas. Em apenas 4, em 14, unidades fixas houve registo de incidências. E, neste caso, registou-se apenas uma incidência em cada uma das unidades afectadas. No caso das unidades com seguimento, do conjunto das 9 unidades analisadas, 6 já registaram incidências. E em 4 delas, por mais que uma vez. Uma análise detalhada aos motivos das incidências revela que 78,6% das anomalias ocorridas nas unidades de microprodução com seguimento solar dizem respeito aos motores.

Apresenta-se ainda na figura 4.4 um gráfico com o tempo de paragem associado às incidências ocorridas nas diferentes unidades.

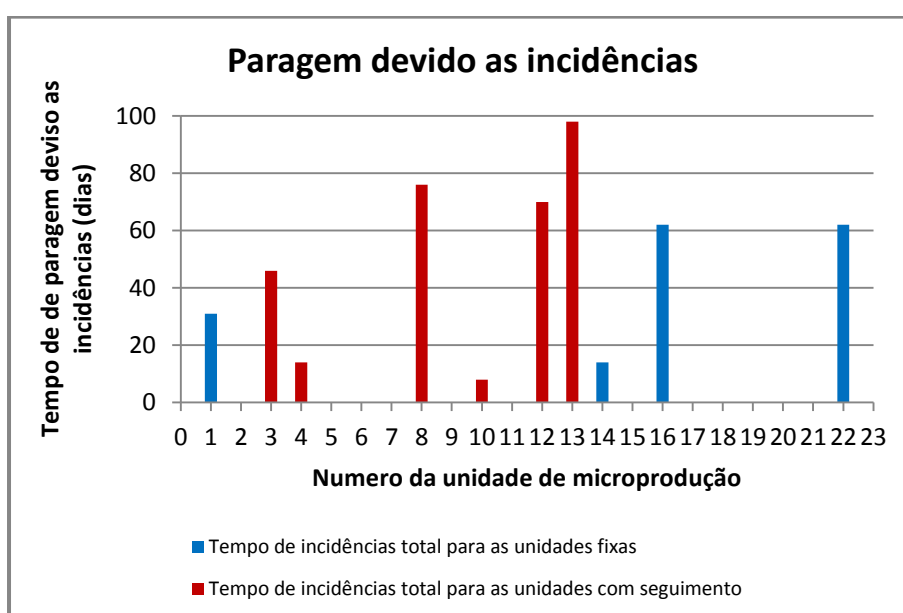


Figura nº 4.4: Tempo das incidências das unidades fotovoltaicas.

Observa-se que nas unidades fotovoltaicas com seguimento solar, para além do número de incidências apresentadas ser significativamente mais elevado, o tempo de reparação das mesmas se prolongou por períodos consideravelmente maiores.

4.3 Cálculo de parâmetros de avaliação e discussão dos resultados obtidos

Para fazer uma análise mais detalhada das diferentes unidades fotovoltaicas de microprodução em estudo recorre-se de seguida ao cálculo e avaliação do índice de desempenho (ID) e do factor de produção (FP), apresentados no capítulo 3. Para o cálculo desses parâmetros de avaliação é necessário conhecer a radiação incidente nas unidades fotovoltaicas em análise.

4.3.1 Apresentação dos parâmetros da irradiação para as unidades em estudo

No cálculo da irradiação para o caso particular de cada uma das unidades de microprodução em estudo utilizou-se informação proveniente da base de dados PVGIS-CMSAF. Essa informação é apresentada na tabela 4.26 e encontra-se de acordo com a notação apresentada na figura n.º 4.5, correspondente à orientação e à inclinação dos módulos fotovoltaicos que constituem o gerador solar.

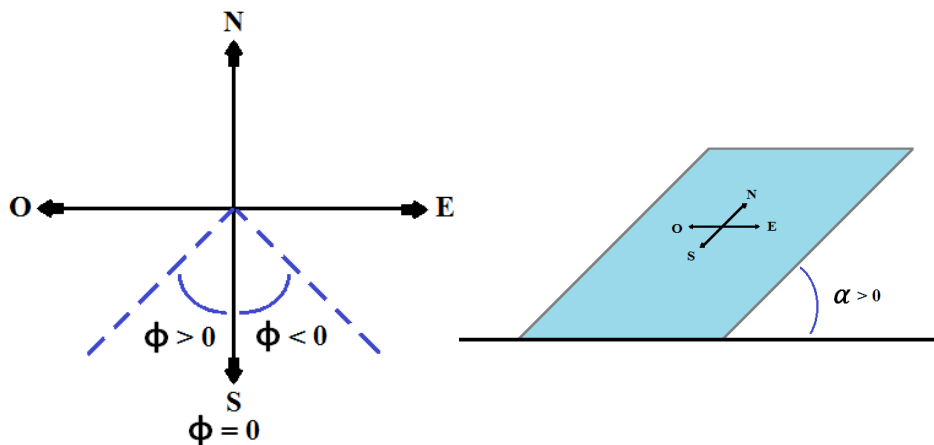


Figura n.º 4.5: Orientação (ϕ) e inclinação (α) do gerador fotovoltaico.

Os valores de irradiação apresentados na tabela n.º 4.26 correspondem a um ano típico para a zona da Covilhã, Portugal. Uma vez que do conjunto de unidades analisadas no estudo fazem parte unidades fixas e unidades com seguimento, apresentam-se dados relativos a ambas as situações.

Tabela nº 4.26: Distribuição mensal da irradiação para as condições correspondentes às unidades fixas e unidades com seguimento estudadas (Base de dados PVGIS-CMSAF)

Irradiação na Covilhã						
Mês	Sistemas Fixos		Sistemas móveis			
	Orientação: $\phi = 0^\circ$ Inclinação: $\alpha = 35^\circ$		1 Eixo Inclinação: $\alpha = 35^\circ$		2 Eixos	
	H_d	H_m	H_d	H_m	H_d	H_m
Janeiro	3,21	99,5	3,75	116	4,03	125
Fevereiro	4,56	128	5,56	156	5,78	162
Março	5,3	164	6,72	208	6,76	209
Abril	5,76	173	7,56	227	7,6	228
Maió	6,15	191	8,36	259	8,62	267
Junho	7,06	212	10,1	303	10,6	319
Julho	7,5	233	10,9	338	11,3	352
Agosto	7,25	225	10	311	10,2	315
Setembro	6,34	190	8,3	249	8,31	249
Outubro	4,76	148	5,88	182	6,02	187
Novembro	3,6	108	4,23	127	4,51	135
Dezembro	3,14	97,4	3,63	112	3,98	123
Média anual	5,39	164	7,1	216	7.32	223
Média ao ano	1970 (74%)		2590 (97%)		2670	

H_d : Média de irradiação diária por metro quadrado (kWh/m^2).

H_m : Irradiação mensal por metro quadrado (kWh/m^2).

Nota: O valor apresentado em parênteses, na última linha, representa a irradiação face à irradiação para o caso do seguidor com dois eixos.

Para que seja mais perceptível a diferença da irradiação para os diferentes tipos de unidade, apresentam-se os seus valores mensais na figura nº 4.6.

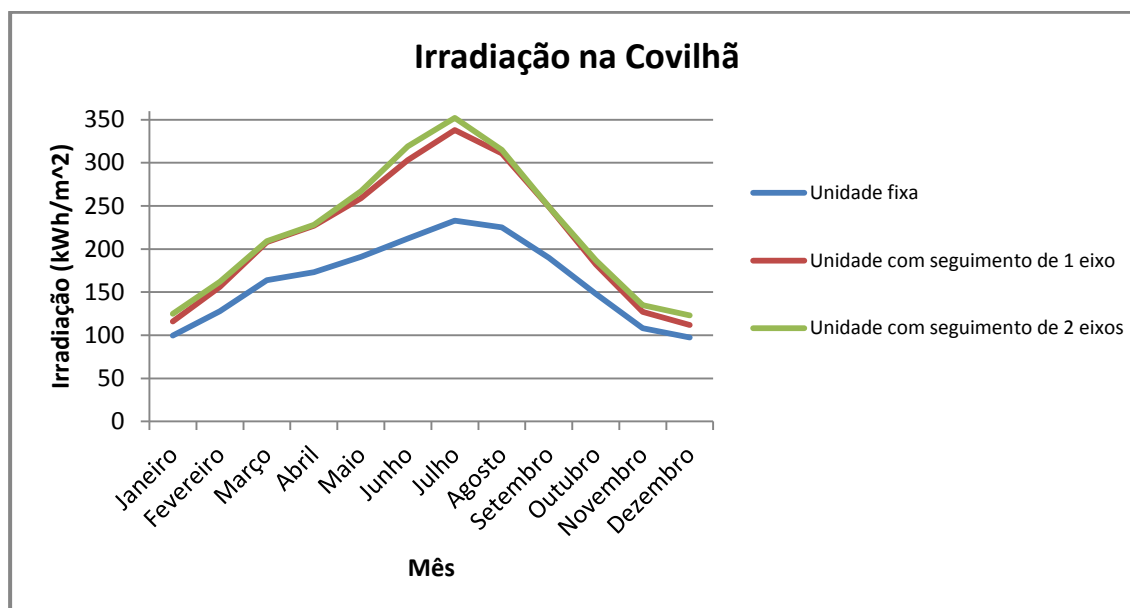


Figura nº 4.5: Distribuição da irradiação ao longo do ano para unidades fixas e unidades com seguimento solar de 1 e 2 eixos.

Como se pode verificar na figura nº 4.6 os valores da irradiação são significativamente diferentes para as unidades fixas comparativamente com as unidades com seguimento solar. Para Portugal as unidades fixas ideais devem apresentar a orientação $\phi = 0^\circ$ e inclinação $\alpha = 35^\circ$. As unidades fixas ideais apresentam menos 26% da irradiação comparativamente com as unidades com seguimento de 2 eixos. Por outro lado, da comparação entre as unidades com seguimento de 1 e de 2 eixos resulta apenas 3% de diferença na irradiação entre elas. Da figura nº 4.6 verifica-se que é no mês de Julho que se obtém maior irradiação por metro quadrado, motivo pela qual as unidades fotovoltaicas apresentam maior produção neste período. O período no qual as unidades fotovoltaicas apresentam menor produção de energia cabe aos meses de Janeiro e Dezembro, quando a irradiação é menor.

Na implementação de unidades fixas, nem sempre o local disponível para a sua implementação permite a orientação e inclinação ideais. Em situações destas, interessa conhecer a influência da orientação e da inclinação na irradiação sobre a superfície dos módulos. Assim, apresentam-se na tabela nº 4.27 as penalizações na irradiação comparativamente com a situação ideal (orientação $\phi = 0^\circ$ e inclinação $\alpha = 35^\circ$) que apresenta, na região da Covilhã, a irradiação média anual de 1970 kW/m².

Tabela nº 4.27: Penalização na irradiação devido a desvios na orientação/inclinação face ao sistema ideal fixo. (Base de dados PVGIS-CMSAF)

Penalização na irradiação comparativamente com a unidade ideal fixa para a Covilhã									
Orientação \ Inclinação	0°	10°	-10°	20°	-20°	30°	-30°	-40°	-45°
0°	13,2 %	13,2 %	13,2 %	13,20%	13,2 %	13,2 %	13,2 %	13,2 %	13,2 %
10°	6,60 %	7,11 %	6,60 %	7,61 %	7,11 %	8,12 %	7,61 %	8,12 %	8,63 %
20°	2,54 %	2,54 %	2,54 %	3,55 %	3,05 %	4,57 %	3,55 %	5,08 %	5,58 %
25°	1,02 %	1,52 %	1,02 %	2,54 %	1,52 %	3,55 %	2,54 %	4,06 %	5,08 %
30°	0,51 %	0,51 %	0,51 %	1,52 %	1,02 %	3,05 %	2,03 %	3,55 %	4,57 %
35°	0 %	0,51 %	0,00 %	1,52 %	1,02 %	3,55 %	2,03 %	4,06 %	5,08 %
40°	0,51 %	1,02 %	0,51 %	2,03 %	1,52 %	4,06 %	2,54 %	4,57 %	5,58 %
45°	1,52 %	2,03 %	1,52 %	3,55 %	2,54 %	5,08 %	3,55 %	5,58 %	7,11 %

Como se pode verificar na tabela nº 4.27 a instalação de estruturas fixas com orientação e inclinação que não seja a ideal implica a diminuição da irradiação. No entanto verifica-se que, por exemplo, as estruturas com o desvio até 10° na orientação e na inclinação, face ao sistema ideal, apresentam uma penalização na irradiação inferior 2%. Por isso é que em alguns casos práticos verifica-se que não é feita a rectificação da orientação e da inclinação do gerador nas unidades fotovoltaicas de microprodução, visto que essa rectificação aumentaria significativamente o custo de implementação sem, no entanto, aumentar proporcionalmente a produção de energia.

Verifica-se que a inclinação interfere mais negativamente no desempenho das unidades fotovoltaicas comparativamente com a orientação.

Como nota final importa referir que a base de dados PVGIS-CMSAF se baseia em informação recolhida em determinadas estações meteorológicas. Os valores da irradiação nos locais entre as estações meteorológicas são calculados por interpolação dos medidos.

4.3.2 Cálculo de parâmetros de avaliação e discussão dos resultados obtidos

O cálculo do índice de desempenho (ID) e o factor de produção (FP) permite avaliar as diferentes unidades fotovoltaicas de microprodução em estudo, permitindo identificar as unidades que apresentam melhor desempenho. Também são calculados a energia ideal produzida pelo sistema fotovoltaica (E_{ideal}) e o factor de dimensionamento do inversor (FDI).

O índice de produção (ID) permite caracterizar a eficiência das unidades fotovoltaicas de microprodução. Este factor relaciona a energia produzida pelo sistema ideal com a energia realmente produzida. O factor de produção (FP) é outro factor caracterizador da produção das unidades fotovoltaicas de microprodução, relacionando a energia produzida e a potência de pico instalada. O factor de dimensionamento do inversor (FDI) relaciona a potência de pico do gerador com a potência de entrada do inversor, caracterizando o sobredimensionamento do gerador para a potência de entrada do inversor. A energia ideal (E_{ideal}) é um parâmetro que calcula a energia ideal produzida do sistema, não considerando as perdas obtidas nos módulos, nos condutores, no inversor, no sistema de protecção etc.. Este parâmetro é necessário para calcular o índice de produção das unidades fotovoltaicas.

A energia ideal produzida (E_{ideal}) em cada uma das unidades fotovoltaicas foi calculada com base na radiação máxima incidente consoante a orientação e inclinação de cada unidade fotovoltaica. Por esse motivo a irradiação considerada para as unidades fixas varia de 5,02 a 5,39 kWh/m². Para as unidades fotovoltaicas com seguidor solar de 1 e 2 eixos foi de 7,1 e 7,32 kWh/m² respectivamente.

Apresentam-se nas tabelas n.º 4.28 e n.º 4.29 os valores calculados para os parâmetros acima referidos. A tabela n.º 4.28 é relativa às unidades fixas enquanto a tabela n.º 4.29 respeita às unidades com seguimento solar. Como foi já referido, os parâmetros calculados permitem uma comparação mais detalhada das unidades fotovoltaicas de microprodução em estudo.

Tabela nº 4.28: Parâmetros de avaliação das unidades fotovoltaicas de microprodução fixas.

Unidade fotovoltaica de microprodução	Unidade fixa				
	Irradiação (kWh/m ²)	Energia ideal produzida (kWh/m ²)	FDI (kWp/kW)	ID (%)	FP (kWh/kWp)
1	5,38	32098,2	0,90	0,73	1,43
2	5,08	32401,9	1,07	0,77	1,43
5	5,28	29603,4	1,10	0,69	1,33
6	5,38	30140,1	1,10	0,74	1,46
11	5,21	16264,1	1,10	0,83	1,59
14	5,08	14370,0	1,08	0,73	1,37
16	5,21	13840,7	1,11	0,77	1,47
17	5,32	13741,7	1,20	0,86	1,61
18	5,08	12805,3	0,95	0,81	1,53
19	5,38	10665,9	1,03	0,71	1,39
20	5,34	8287,7	0,99	0,62	1,21
21	5,02	7825,0	1,11	0,74	1,35
22	5,16	1069,6	1,05	0,70	1,32
23	5,27	513,6	1,11	1,01	1,84
Média				0,75	1,44

Relativamente ao período de funcionamento das unidades fotovoltaicas de microprodução, verifica-se que as três últimas unidades, 21, 22 e 23, apresentam um período de funcionamento inferior a 1 ano, originando valores que não devem ser tidos em conta no cálculo da média do índice de desempenho (ID) e na média do factor de produção (FP). O reduzido período de funcionamento da unidade 23, com 22 dias de funcionamento em Setembro, justifica que apresente os valores mais altos referentes ao índice de desempenho (ID) e ao factor de produção (FP), que não devem ser considerados no cálculo dos valores médios.

Das unidades fotovoltaicas de microprodução fixas a que apresenta o melhor índice de desempenho (ID) e melhor factor de produção (FP) é a unidade 17, como se verifica na tabela nº 4.28. Verifica-se também que esta unidade apresenta o maior factor de dimensionamento do inversor e maior média diária de energia produzida. Esta unidade apresenta-se dentro do desvio de 10° relativamente à orientação ideal dos sistemas fixos, e tem uma potência de ligação de 3,68kW e é constituída por módulos com células de silício policristalino.

Das unidades fotovoltaicas de microprodução fixas a que apresenta o pior de desempenho é a unidade 20, visto que apresenta o mais baixo índice de desempenho (ID), o mais baixo factor de produção (FP) e a mais baixa média de energia ao dia, como se verifica na tabela 4.28. Está unidade apresenta-se dentro do desvio de 10° sobre a orientação ideal dos sistemas fixos, e caracteriza-se por apresentar a potência de ligação de 3,45kW e os módulos serem constituídos com células de silício monocristalino.

Da comparação do índice de desempenho (ID) com o desvio na orientação do gerador, verifica-se que das unidades fotovoltaicas que apresentam o gerador com desvio na orientação, 57% apresentam o índice acima da média, enquanto para as unidades de orientação igual a zero, só 29% apresentam o índice de desempenho acima da média. Isto permite concluir que, apesar das unidades com desvio na orientação apresentarem menor irradiação que a orientação ideal, pelo facto do período de melhor funcionamento do gerador coincidir com períodos do dia em que a temperatura é menor, estes apresentem melhores resultados no índice de desempenho. Estes períodos de funcionamento correspondem a períodos da manhã ou da tarde, consoante a orientação do gerador para a nascente ($\phi < 0$) ou a poente ($\phi > 0$), quando a temperatura ambiente é menor, a que corresponde maior eficiência de conversão nos módulos.

Como se pode verificar nas folhas técnicas dos módulos, constituídos por células monocristalinas ou policristalinas, estes apresentam uma diminuição na potência máxima de cerca de 0,4% por grau Celsius de aumento da temperatura (0,4%/°C). A temperatura de funcionamento do gerador influencia significativamente a produção das unidades fotovoltaicas.

Das unidades fotovoltaicas fixas 36% apresentam índice de desempenho (ID) e factor de produção (FP) acima da média, e 57% apresentam índice de desempenho e factor e produção abaixo da média. A tabela nº 4.29 apresenta os parâmetros de avaliação referentes às unidades com seguimento solar.

Tabela nº 4.29: Parâmetros de avaliação das unidades fotovoltaicas com seguimento solar.

Unidade fotovoltaica de microprodução	Unidade com seguimento solar				
	Irradiação (kWh/m ²)	Energia ideal produzida (kWh/m ²)	FDI (kWp/kW)	ID (%)	FP (kWh/kWp)
3	7,1	45334,8	1,07	0,66	1,89
4	7,1	41453,3	1,07	0,66	1,84
7	5,28	33146,7	0,97	0,72	1,89
8	5,38	39618,3	1,07	0,66	1,85
9	7,1	37093,7	1,22	0,68	1,84
10	7,1	35217,1	1,20	0,61	2,18
12	7,1	24184,9	1,20	0,70	1,83
13	7,1	23885,1	1,20	0,60	1,60
15	5,21	21571,1	1,15	0,74	2,11
Média				0,67	1,89

Das unidades com seguimento solar verifica-se que a unidade fotovoltaica 10 apresenta o melhor factor de produção (FP) em simultâneo com o melhor resultado quanto à média de energia diária produzida. Esta unidade caracteriza-se pela potência de ligação de 3,68kW e os módulos serem constituídos por células de silício monocristalino. No entanto cabe à unidade 15 apresentar o melhor índice de desempenho. A unidade 15 caracteriza-se por ter uma potência de ligação de 3,45kW, os módulos serem constituídos por células de silício policristalinas e tratar-se de sistema que apresenta um seguidor de dois eixos.

Das unidades fotovoltaicas de microprodução com seguidor solar a que apresenta o pior desempenho é a unidade 13, visto que apresenta o mais baixo índice de desempenho (ID), mais baixo factor de produção (FP) e a mais baixa média de energia ao dia. Está unidade caracteriza-se por apresentar a potência de ligação de 3,68kW e os módulos serem constituídos com células de silício policristalino. Contudo, o fraco desempenho desta unidade está fortemente associado ao elevado tempo de paragem da unidade em virtude das incidências ocorridas.

Das unidades fotovoltaicas com seguidor 56% apresentam índice de desempenho (ID) acima da média enquanto que, relativamente ao factor de produção (FP), o valor se fica pelos 44%. Só 22% das unidades apresentam em simultâneo o índice de desempenho e o factor de produção acima da média.

Para a melhor análise dos valores do índice de produção das unidades de microprodução, estes são apresentados graficamente na figura nº 4.6.

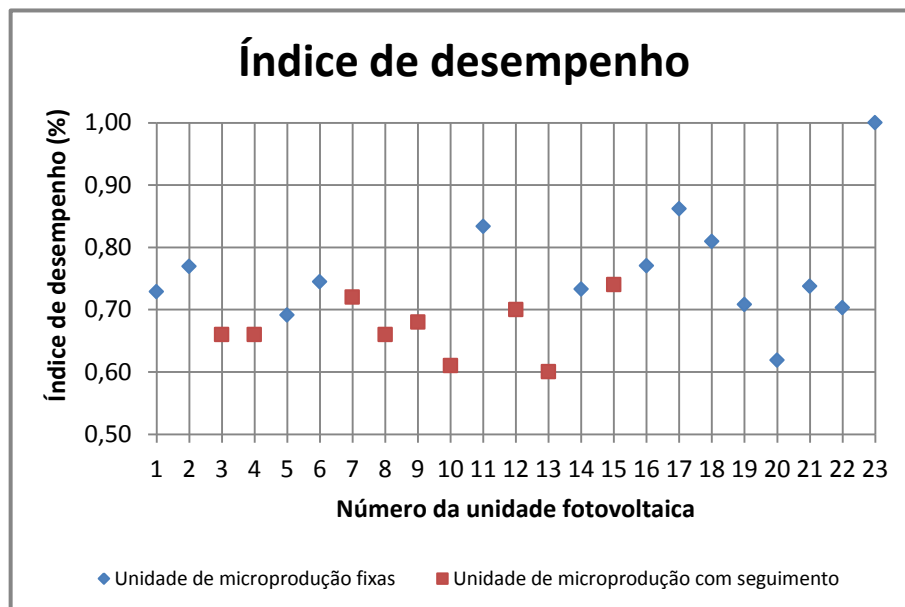


Figura nº 4.6: Índice de desempenho das unidades fotovoltaicas

Da comparação dos parâmetros de avaliação das unidades fotovoltaicas fixas e das unidades fotovoltaicas com seguimento solar verifica-se que as unidades fotovoltaicas de microprodução fixas apresentam uma média superior do índice de desempenho (ID) em 8%. Este facto é justificado pelo facto das unidades móveis estarem sujeitas a temperaturas de funcionamento mais elevadas. As temperaturas de funcionamento das unidades com seguimento solar apresentam-se maiores porque, como já vimos, apresentam em média mais 26% de irradiação incidente que aumenta a temperatura funcionamento e prejudica o desempenho das unidades. As unidades fotovoltaicas com seguimento solar também apresentam o índice de desempenho mais baixo porque apresentam mais 71,4% de incidências que as unidades fixas, para além de maior número de incidências apresentam também mais tempo de reparação dessas mesmas incidências.

Não se verifica que as unidades fotovoltaicas com potência de ligação de 3,45 kW tenham pior índice de desempenho que as unidades com potência de ligação de 3,68 kW, pois o facto de possuírem diferentes potências de ligação foi considerado no cálculo da energia produzida em condições ideais.

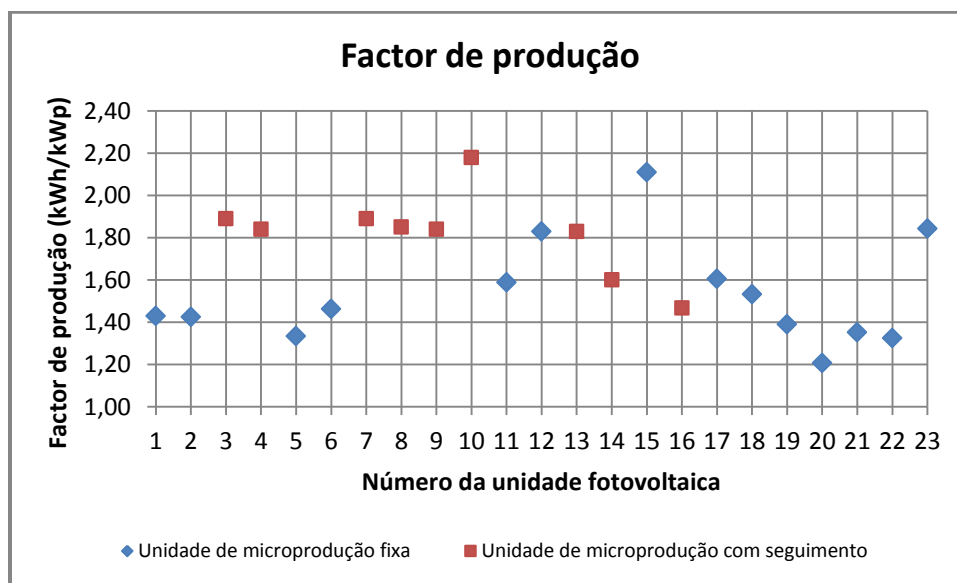


Figura nº 4.7: Comparação da média diária de energia produzida e do factor de produção das unidades fotovoltaicas.

Como é de esperar as unidades fotovoltaicas com seguimento solar apresentam valores de factor de produção (FP) mais elevados, visto que este factor relaciona a energia produzida com a potência de pico instalada.

Da comparação entre a média diária de energia produzida, tabela n.º 4.25, e factor de produção, apresentado na figura nº 4.7, verifica-se que estes parâmetros apresentam o mesmo comportamento. Este comportamento é compreensível visto que estes dois parâmetros têm como ponto de partida a energia total produzida nas unidades. O que permite concluir que os dois parâmetros apresentam avaliações e conclusões semelhantes.

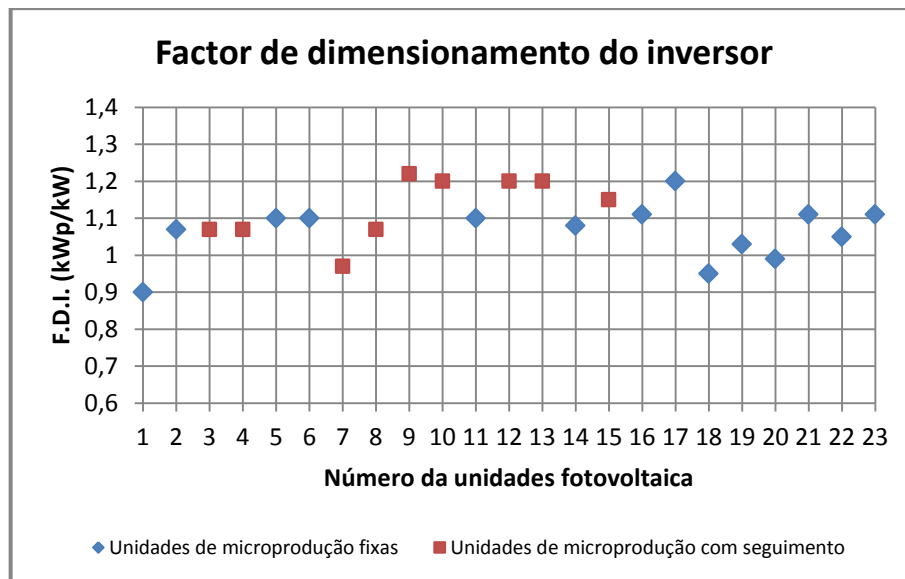


Figura nº 4.8: Factor de dimensionamento do inversor das unidades fotovoltaicas.

Da figura nº 4.8 verifica-se que para as unidades de microprodução que apresentam factor de dimensionamento do inversor inferior a 1 apresentam, também, o índice de desempenho abaixo da média, com a excepção da unidade fotovoltaica 18. Este facto revela uma relação entre o factor de dimensionamento do inversor e o índice de desempenho.

O índice de desempenho e o factor de produção são dois parâmetros de avaliação das unidades fotovoltaicas que não apresentam necessariamente o mesmo comportamento, como se verifica, por exemplo, na unidade 10. Esta diferença de resultados obtidos nestes dois parâmetros verifica-se pelo facto destes se basearem em dados diferentes. O índice de desempenho baseia-se na relação da energia real obtida e da energia ideal, quantificando a eficiência do sistema. Já o factor de produção baseia-se na relação da energia real produzida com a potência de pico instalada. Verifica-se também que as unidades fixas apresentam em média maior índice de desempenho que as unidades com seguimento. Este comportamento justifica-se pelo facto das unidades com seguidor solar apresentarem-se sempre a funcionar a maiores temperaturas devido à radiação incidente nestes apresentarem-se em maiores proporções.

4.4 Nota conclusiva

A análise, avaliação e comparação efectuada neste capítulo incidiu sobre 23 unidades fotovoltaicas de microprodução em pleno funcionamento. Das unidades fotovoltaicas de microprodução estudadas, 14 são unidades fotovoltaicas de microprodução fixas e as restantes 9 são unidades fotovoltaicas de microprodução com seguimento solar, de 1 ou 2 eixos.

Algumas das unidades fotovoltaicas fixas estudadas não apresentem a orientação e inclinação ideais, pelo que apresentam menores quantidades de radiação incidente no gerador. Contudo, verifica-se, por exemplo, que as unidades que apresentam um desvio de 10° face à orientação e inclinação ideais apresentam perdas pouco significativas que não chegam a 2%.

Da avaliação das unidades fotovoltaicas de microprodução em pleno funcionamento verificou-se que as unidades fotovoltaicas fixas apresentavam menos 71,4% incidências que as unidades fotovoltaicas com seguimento, bem como menor tempo de rectificação dessas incidências. Das incidências ocorridas nas unidades fotovoltaicas com seguimento 78,6% ocorriam devido a avarias nos motores dos seguidores.

No estudo efectuado verificou-se que as unidades fotovoltaicas com seguimento solar apresentavam em média mais 23% de energia produzida, quando comparados com as unidades fixas. Este valor está muito próximo do valor teórico aceite que é de cerca de 25%.

A avaliação dos parâmetros de desempenho das unidades permitiu verificar que as unidades fotovoltaicas fixas apresentam, em média, um índice de desempenho 8% superior que as unidades com seguimento solar. Este facto deve-se, em parte, à existência de incidência em maior número e com maior tempo de resolução no caso das unidades com seguimento. Adicionalmente, o facto da temperatura de funcionamento das unidades fotovoltaicas com seguimento ser superior pode justificar esta diferença. Da análise do factor de produção verificou-se, naturalmente, que as unidades com seguimento apresentavam melhores resultados.

Capítulo 5

5 Conclusão

O aumento do custo da energia devido às últimas crises energéticas no sector petrolífero, as alterações climáticas que se tem feito sentir nos últimos anos e as catástrofes ambientais provocados pela exploração de combustíveis fósseis tem levado países por todo mundo a adoptar políticas de apoio as fontes de energia renovável. A aposta nas energias renováveis apresenta-se mais segura e sustentável para o futuro, visto que estas são inesgotáveis e encontram-se presentes em todo o mundo. O tratado de Quioto, de 11 de Dezembro de 1997, veio, também, impulsionar a implementação de fontes de energia renovável, obrigando os países signatários do tratado a estabelecer metas para a redução da CO₂.

Em Portugal, verifica-se igualmente uma mudança significativa do paradigma energético a qual registou uma diminuição da importação de energia de 84,9% para 77,5% entre o período de 2000 e 2011, devido, em boa parte, à grande aposta nas energias renováveis. A potência total instalada de fontes de energia renovável no final de 2012 em Portugal Continental era de 10,583 MW, da qual resultou, nesse ano, a produção de 19 TWh de energia eléctrica, representando cerca de 45,6% no consumo bruto de energia eléctrica. Apesar do mercado da microprodução ser relativamente recente, do total da energia eléctrica produzida por fontes de energia renovável em 2012 a microprodução contribuiu com 138 MWh, com uma potência instalada de 99,8 MW até ao final do mesmo ano, de acordo com DGEG (2013).

A criação de políticas e apoios direccionados para a implementação das energias renováveis, tornaram este mercado mais acessível e apelativo aos investidores, ao mesmo tempo que tem permitido diminuir a forte dependência energética do país em relação aos combustíveis fósseis, além de que vem ajudar na resposta aos picos de maior consumo de energia verificados durante o dia, nas horas de maior consumo. O Decreto-Lei 363/2007, de 2 de Novembro é um exemplo das medidas políticas que vieram tornar o mercado da microprodução e miniprodução mais acessível, com a criação do programa *renováveis na hora*, que diminuiu o tempo e as burocracias referentes aos procedimentos legislativos. Este decreto estabeleceu um regime bonificado com apoios na remuneração da tarifa eléctrica e isenção de IVA.

A realização do presente trabalho permitiu recolher muita informação referente ao funcionamento dos equipamentos utilizados em unidades fotovoltaicas. Verificou-se que esta é uma área sobre a qual tem incidido vários estudos de natureza científica e tecnológica, que procuram o desenvolvimento de novas tecnologias e/ou a melhoria das tecnologias já existentes.

Verificou-se, nos últimos anos, um forte crescimento da indústria ligada às energias renováveis, sendo esta uma das áreas que mais se tem expandido, apresentado taxas de crescimento que estão entre 35 e 40%. A atenção dada por parte da indústria à área fotovoltaica reflete-se na apresentação frequente de novos produtos, alguns direccionados especificamente para o mercado da microprodução fotovoltaica, cada vez mais eficientes, com mais funcionalidades, com menor custo de produção e de aplicação.

A realização deste trabalho permitiu, igualmente, verificar que os preços da energia produzida por via fotovoltaica não conseguem ainda competir directamente com os preços da energia proveniente de derivados fósseis. No entanto, olhando para a evolução da tecnologia e atendendo à redução do custo que resultará da sua produção em massa, admite-se que, em pouco tempo, ela possa competir directamente com outras formas de produção de energia. Cabe às políticas implementadas nos diferentes países a responsabilidade da aposta nesta tecnologia, para que ela possa superar as suas barreiras.

No presente trabalho foram realizados cálculos para o dimensionamento e estimativa de produção de quatro unidades exemplificativas de microprodução fotovoltaica. Os resultados obtidos foram confrontados com resultados provenientes da simulação com programas disponibilizados pelos fabricantes dos inversores considerados, tendo sido verificada boa concordância entre eles. Foi realizado um estudo prático em que foram recolhidas informações relativas a 23 unidades fotovoltaicas de microprodução em pleno funcionamento. Dessas 14 são unidades fotovoltaicas fixas e as restantes 9 são unidades fotovoltaicas com seguimento solar. Da informação recolhida consta a potência de ligação da unidade, as características do equipamento que a constitui, a data de ligação à rede, a energia total produzida e as anomalias entretanto verificadas no seu funcionamento.

Foi efectuada a análise à informação recolhida e foram calculados alguns parâmetros que permitem avaliar o desempenho das referidas unidades. Dessa análise resultou um conjunto de conclusões que se apresentam a seguir.

As unidades fixas apresentam menos 71,4% de anomalias que as unidades com seguidor solar. As unidades fotovoltaicas fixas apresentam em média o índice de desempenho (ID) superior em 8% quando comparado com as unidades fotovoltaicas com seguimento solar. Isto acontece devido ao facto das unidades fotovoltaicas com seguimento solar apresentarem maiores temperaturas de funcionamento, como também apresentarem maior número de incidências e maior tempo na resolução das incidências. As unidades fotovoltaicas fixas que apresentam índice de desempenho (ID) acima da média também apresentam factor de produção (FP) acima da média.

As unidades fotovoltaicas com seguimento solar apresentam em média mais 23% de energia produzida que as unidades fixas, valor muito próximo do valor teórico que aponta um ganho de 26%. Verificou-se também que 78,6% das avarias ocorridas nas unidades com seguidor solar ocorrem devido a avaria dos motores dos seguidores solares. Das unidades fotovoltaicas com seguidor solar apenas 22% apresentam, em simultâneo, índice de desempenho (ID) e factor de produção (FP) acima da média.

Verifica-se que o comportamento referente a média diária de energia produção e do factor de produção (FP) apresentam o mesmo padrão.

Verificou-se que as unidades fotovoltaicas com potência de ligação de 3,45 kW apresentam índice de desempenho médio ligeiramente superior ao das unidades fotovoltaicas com potência de 3,68 kW, 74% e 70%, respectivamente.

Verificou-se ainda que o número de módulos que constituem o gerador fotovoltaico tem vindo a diminuir, muito pelo facto da potência e eficiência dos módulos ter vindo a aumentar. A análise às folhas técnicas dos módulos utilizados nas unidades estudadas, monocristalinos e policristalinos, revelou que estes apresentam comportamentos semelhantes face ao aumento da temperatura.

Bibliografia

Afonso, J., L. & Martins, J., S. (2004). *Qualidade da energia eléctrica*. Universidade do Minho, Revista o Electricista. (30/04/2013)

http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/1920/1/Electricista_04.pdf

Aplicações tecnológicas, *Causas das sobretensões e mecanismos de protecção*. (29/04/2013)

[http://pararaios-at3w.pt/upload/ficheros/divulg_causas_de_las_sobretensiones\[1\].doc-p.pdf](http://pararaios-at3w.pt/upload/ficheros/divulg_causas_de_las_sobretensiones[1].doc-p.pdf)

Asim, N., Sopian, K., Ahmadi, S., Saeedfar, K., Alghoul, M., Saadatian, O., Zaidi, S. (2012). A review on the role of materials science in solar cells (Ed.). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Chap 8, pp. 5834-5847). Amsterdam: Elsevier. (21/09/2013)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211200384X#>

Batayneh, W., Owais, A., Nairoukh, M. (2013, January). An intelligent fuzzy based tracking controller for a dual-axis solar PV system. *Automation in Construction*, Volume 29 , pp 100-106. (22/09/2013)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580512001550>

Benito, T. P. (2009). *Praticas de Energia Solar Fotovoltaica*. Publindústria.

Bojanowski, J., Vrieling, A., Skidmore, A. (2013, July 15). *Calibration of solar radiation models for Europe using Meteosat Second Generation and weather station data*. Agricultural and Forest Meteorology (Volume 176 , pp 1-9). (23/09/2013)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192313000592>

Carvalho, S. (2011). *Análise e Caracterização Energética de Sistemas Fotovoltaicos de Baixa Potência com Ligação a Rede Eléctrica*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

Certiel. *Guia prático de implementação de sistemas de microprodução*.

Chandrasekaran, J., Nithyaprakash, D., Ajjian, K., Maruthamuthu, S., Manoharan, D., Kumar, S. (2011). Hybrid solar cell based on blending of organic and inorganic materials— An overview (Ed.). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Chap 2 , pp. 1228-1238). Amsterdam: Elsevier. (21/09/2013)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110003047#>

Chang, R. (2005). *Química*, 8ª edição. Mc Graw Hill.

Decreto-Lei n.º 363/2007 de 2 de Novembro, Ministério da Economia e da Inovação, 2007.

Decreto-Lei n.º 25/2013 de 19 de Fevereiro, Ministério da Economia e do Emprego, 2010.

Decreto-Lei n.º 118-A/2010 de 25 de Outubro, Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento, 2010.

Deixando, L., Munda, J., Hamam, Y. (2012). Optimization of a fuzzy logic controller for PV grid inverter control using S-function based PSO (Ed.). *Solar Energy* (Vol. 86, Chap 6, pp. 1689-1700). Amsterdam: Elsevier. (23/09/2013)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X12001247#>

DGEG. (Fevereiro, 2013). *Renováveis: Estatísticas Rápidas*.

DGEG. (Julho, 2013). *Renováveis: Estatísticas Rápidas*.

Eke, R. & Senturk, A. (2012). Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system (Ed.). *Solar Energy* (Vol. 86, Chap 9, pp. 2665-2672). Amsterdam: Elsevier. (22/09/2013)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X12002174#>

EPIE, (2013). *Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017*. European Photovoltaic Industry Association. (27/08/2013)

http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/GMO_2013_-_Final_PDF.pdf

EREC. (2005). *European Renewable Energy Council*. (24/02/2013)

http://erec-renewables.org/publications/scenario_2040.htm

Espinosa, N., García, R., Urbina, A., Krebs, F. (2011). A life cycle analysis of polymer solar cell modules prepared using roll-to-roll methods under ambient conditions (Ed.). *Solar Energy Materials & Solar Cells* (Vol. 95, Chap 5, pp. 1293-1302). Amsterdam: Elsevier. (22/09/2013)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024810004770#>

European Commission. (2008a). Directorate General For Energy and transport, Europe's energy position - present & future, Market Observatory for Energy - Report 2008.

Eurostat. (18/09/2013)

<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=en&pcod e=tsdcc310>

Freitas, F. E. (2006). *CÉLULA SOLAR DE SNO₂/TIO₂ PREPARADA POR “SPRAY” - PIRÓLISE ATIVADA COM CORANTE ORGÂNICO*, Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira-SP, Brasil. (27/05/2013)

<http://www.dfq.feis.unesp.br/pos/teses/disser-48.pdf>

Ghani, Z., Hannan, M., Mohamed, A. (2013, February). Simulation model linked PV inverter implementation utilizing dSPACE DS1104 controller. *Energy and Buildings* (Volume 57, pp 65-73). (23/09/2013)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812005622#>

GREENPRO. (2004). *Guia Técnico de Produção Independente de energia eléctrica*. Portal Energias Renováveis.

GTES. (2004). *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Edição Especial, PRC-PRODEEM, Ediouro Gráfica e Editora.

Huld, T., Muller, R., Gambardella, A. (2012). A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa (Ed.). *Solar Energy* (Vol. 86, Chap 6 , pp. 1803-1815). Amsterdam: Elsevier. (23/09/2013)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X12001119#>

JUNIOR, J. U. (2010). *Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: Sua Influência na Qualidade da Energia Eléctrica e Análise dos Parâmetros que Possam Afectar a Conectividade*, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Koussa, M., Cheknane, A., Hadji, S., Haddadi, M., Noureddine, S. (2011). Measured and modelled improvement in solar energy yield from flat plate photovoltaic systems utilizing different tracking systems and under a range of environmental conditions (Ed.). *Applied Energy* (Vol.88, Chap 5 , pp. 1756-1771). Amsterdam: Elsevier. (22/09/2013)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910005088#>

Korachagaon, I. & Bapat, V. (2012, May). *General formula for the estimation of global solar radiation on earth's surface around the globe*. *Renewable Energy*, (Volume 41, pp 394-400). (23/09/2013)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148111006045>

Macêdo, W. (2006). *Análise do factor de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede*. Pós-Graduação, Universidade de S. Paulo, Brasil.

Morais, J., L. & Pereira, J. M. G. (2007). *Guia técnico das instalações eléctricas*. Lisboa: Certiel.

Morais, J. (2009). *Sistemas Fotovoltaicos: Da Teoria à Prática*. Grafilinha.

Parida, B., Iniyar, S., Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies (Ed.). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Chap 3, pp. 1625-1636). Amsterdam: Elsevier. (21/09/2013)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110004016#>

Pinto, L., M., V. (2004). *Instalexpress: Instalações eléctricas em locais de habitação*. Porto. Certiel.

Pires, L. (2010). Desenvolvimento e estudo experimental de uma unidade para o arrefecimento passivo de edifícios, Tese de doutorado, Universidade da Beira Interior, Portugal.

Proença, E. D. R. B. (2007). *A Energia Solar Fotovoltaica em Portugal, Estado-da-Arte e Perspectivas de Desenvolvimento*. Dissertação de mestrado, Universidade Técnica de Lisboa.

Roriz, L., Rosendo, J., Lourenço, F., Calhau, K. (2010). *Energia Solar em Edifícios*. Edições Orion.

Singh, G., K. (2012, May 1). Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. *Energy*, Volume 53, pp 1-13. (24/09/2013)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213001758>

Tyagi, V., Rahim, N., Rahim, N. A., Selvaraj, L. (2013, April). Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 20, pp 443-461. (24/09/2013)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112005291#>

Visotela, *Manual do utilizador, Instalação de Micro produção Fotovoltaica de energia*, V01-3300.

Wright, M. & Uddin, A. (2012, December). Organic-inorganic hybrid solar cells: A comparative review (Ed.). *Solar Energy Materials & Solar Cells* (Vol. 107, pp. 87-111). Amsterdam: Elsevier. (21/09/2013)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024812003595#>

Anexos 1

As definições associadas aos efeitos existentes na rede são referidas posteriormente, retiradas de Afonso (2004).

“- Distorção harmónica: quando existem cargas não lineares ligadas à rede eléctrica a corrente que circula nas linhas contém harmónicos e as quedas de tensão provocadas pelos harmónicos nas impedâncias das linhas faz com que as tensões de alimentação fiquem também distorcidas.

- Ruído (interferência electromagnética): corresponde ao ruído electromagnético de alta-frequência, que pode, por exemplo, ser produzido pelas comutações rápidas dos conversores electrónicos de potência.

- Interrupção momentânea: ocorre, por exemplo, quando o sistema eléctrico dispõe de disjuntores com religador, que abrem na ocorrência de um curto-circuito, fechando-se automaticamente após alguns milissegundos (e mantendo-se ligados caso o curto-circuito já se tenha extinguido).

- Subtensão momentânea (voltage sag): também conhecido por “cava de tensão”, pode ser provocada, por exemplo, por um curto-circuito momentâneo num outro alimentador do mesmo sistema eléctrico, que é eliminado após alguns milissegundos pela abertura do disjuntor do ramal em curto.

- Sobretensão momentânea (voltage swell): pode ser provocada, entre outros casos, por situações de defeito ou operações de comutação de equipamentos ligados à rede eléctrica.

- Flutuação da tensão (flicker): acontece devido a variações intermitentes de certas cargas, causando flutuações nas tensões de alimentação (que se traduz, por exemplo, em oscilações na intensidade da iluminação eléctrica).

- Micro-cortes de tensão (notches): consistem em pequenos cortes periódicos na forma de onda da tensão, que resultam de quedas de tensão nas indutâncias do sistema eléctrico, ocorridas devido a cargas que consomem correntes com variações bruscas periódicas (caso dos rectificadores com filtro capacitivo ou indutivo).”