

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Comparação de Métodos de Seguimento Solar para Sistemas Fotovoltaicos

Ricardo Jorge Rosa dos Reis Costa

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2011

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Comparação de Métodos de Seguimento Solar para Sistemas Fotovoltaicos

Ricardo Jorge Rosa dos Reis Costa

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Trabalho realizado sob a supervisão de

Doutor António Luiz Moura Joyce (LNEG)

Engenheiro João Augusto Farinha Mendes (FCUL\LNEG)

2011

RESUMO

Desde o início da humanidade que esta consome recursos energéticos para a sua própria sobrevivência e desenvolvimento. Após a revolução industrial, o impacto da actividade humana sobre o meio ambiente tornou-se mais expressivo. As alterações climáticas patentes a nível global estão na base da preocupação mundial relativamente aos consumos energéticos essenciais para um desenvolvimento sustentável. A consciência do Homem para este acontecimento é cada vez maior e, neste sentido, políticas ambientais têm vindo a ser desenvolvidas e a tornar-se cada vez mais rigorosas.

Em resposta a estas necessidades, vários países acordaram na utilização de fontes de energia renováveis. As obrigações legais impostas pelas directivas comunitárias e pelo Acordo de Quioto apenas reforçam essa necessidade. A estratégia Portuguesa sobre a energia proveniente de fontes renováveis, segue a legislação europeia e completa-a com a legislação nacional que estabelece metas e dá orientações mais específicas.

Portugal é um dos países da União Europeia, e do mundo, com maior potencial em energias renováveis. Este potencial advém da sua localização geográfica, de onde se destaca entre outros, a potencialidade do recurso solar. Contudo, o sector da energia solar é ainda, em Portugal muito subaproveitado e é aquele onde existirá um maior desperdício do seu real potencial.

No decurso desta dissertação foi desenvolvida uma metodologia que efectua a avaliação da radiação solar disponível em superfícies com seguimento solar, comparativamente a superfícies estacionárias com inclinação óptima, em 40 localidades de Portugal Continental. Para o estudo foram utilizados dados de radiação global horizontal e radiação difusa horizontal, correspondentes a um ano, com um intervalo de amostragem horário.

A partir da metodologia desenvolvida e a título de exemplo, verifica-se, comparativamente a uma superfície estacionária com inclinação óptima, um aumento médio de 33% da radiação solar global incidente numa superfície com seguimento solar a dois eixos.

Palavras-chave: Radiação solar, fotovoltaico, sistemas estacionários, sistemas de seguimento.

ABSTRACT

Since the beginning of mankind that energy resources are consumed for the survival and development of the human civilization. After the industrial revolution, the impact of human activity on the environment has become more expressive. Regarding energy consumption, essential for sustainable development, global climate changes are one of the main concerns. For this reason environmental policies have been developed and are becoming increasingly stringent.

In response to these needs, several countries agreed on the use of renewable energy resources. The legal obligations imposed by European Union (EU) Directives and the Kyoto agreement only reinforced this need. The Portuguese strategy on energy from renewable resources follows the European legislation and completes it with national legislation establishing goals and more specific guidance.

Portugal is, not only in the EU, but also in the world, a country with a high potential in renewable energy resources, namely Solar Energy. This potential derives from its geographic location. However, the solar energy sector is still underused in Portugal leading to considerable waste of its potential.

The aim of this work was develop a methodology capable of evaluating the solar radiation available on surfaces with solar tracking, and compare it to stationary surfaces with optimal slope in 40 locations in Portugal. For this study, data from global horizontal radiation and diffuse horizontal radiation were used, corresponding to one year, with a sampling interval of one hour.

The model developed showed, as for instance an average increase of 33% of the incident global solar radiation on a surface with two axis solar tracking, compared to a stationary surface with optimal tilt.

Keywords: Solar radiation, photovoltaic, stationary systems, tracking systems.

AGRADECIMENTOS

Devo destacar, não por uma ordem hierárquica, a intervenção directa ou indirecta das pessoas que constituíram um núcleo fundamental e a quem, neste trabalho, presto os meus sinceros agradecimentos.

Agradeço a toda a minha Família, em particular aos meus Pais, todo o afecto, amor, apoio e paciência que tiveram ao longo da minha vida. Se hoje escrevo estas linhas, devo-o a eles.

Gostaria de seguida, agradecer a todas as pessoas que contribuíram directa ou indirectamente na realização deste trabalho, e pelas quais guardo uma grande estima.

A todos os meus Amigos, que sempre me apoiaram e ajudaram nos bons e maus momentos ao longo da minha vida.

Aos Srs. Ctes. Domingos Piçarra e Rodrigues Marques, pelo apoio e incentivo que permanentemente demonstraram.

Gostaria também de agradecer, ao Eng. João Augusto Farinha Mendes e em particular ao Doutor António Luiz Moura Joyce, o acompanhamento, a disponibilidade e a orientação fundamentais em todo o desenrolar desta dissertação.

À minha princesa, pelo apoio emocional e palavras de encorajamento sempre presentes desde o dia em que nos conhecemos.

Dedico este trabalho à minha Joaquina

ÍNDICE

RESUMO	i
ABSTRACT	iii
AGRADECIMENTOS	v
ÍNDICE	vii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
LISTA DE ABREVIATURAS	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objectivos.....	2
1.3. Estrutura da Dissertação.....	2
2. A Energia Fotovoltaica – Estado da Arte.....	3
2.1. Energia solar e o efeito fotovoltaico.....	3
2.2. O aproveitamento da energia fotovoltaica em Portugal	4
2.3. Sistemas e aplicações fotovoltaicas.....	5
2.3.1. Sistemas fotovoltaicos autónomos	6
2.3.2. Sistemas fotovoltaicos ligados à rede.....	8
2.4. Componentes de um sistema fotovoltaico.....	9
2.4.1. Células fotovoltaicas	9
2.4.2. Armazenamento de energia	11
2.4.3. Controladores/reguladores de carga	12
2.4.4. Inversores CC/CA	13
2.5. Sistemas fotovoltaicos estacionários e de seguimento	14
2.5.1. Painéis fotovoltaicos estacionários.....	14
2.5.2. Sistemas fotovoltaicos com seguimento.....	15

2.5.3.	Limitações do seguimento solar	19
2.5.4.	Sistemas concentradores fotovoltaicos	19
3.	Estudo da Radiação Solar	21
3.1.	Introdução.....	21
3.2.	O Sol.....	21
3.3.	Radiação Solar.....	22
3.3.1.	Constante Solar.....	22
3.3.2.	Radiação Extraterrestre	22
3.3.3.	Componentes da Radiação Solar	23
3.4.	Relações astronómicas Terra-Sol	24
3.4.1.	Excentricidade da Terra.....	24
3.4.2.	Sistema geográfico	25
3.4.3.	Tempo Solar	25
3.5.	Radiação Solar disponível	31
3.5.1.	Medição da Radiação Solar	31
3.5.2.	Estimativa da irradiação solar	32
3.6.	Estudo da Radiação Solar	33
3.6.1.	Radiação extraterrestre em superfícies horizontais	33
3.6.2.	Radiação global em superfícies inclinadas.....	34
3.6.3.	Superfícies inclinadas.....	36
3.6.4.	Modelos de Radiação Solar.....	38
4.	Aplicação da Metodologia Desenvolvida e Discussão dos Resultados Obtidos	41
4.1.	Considerações Iniciais	41
4.2.	Aplicação da Metodologia Desenvolvida.....	42
4.2.1.	Geometria Terra-Sol.....	43
4.2.2.	Cálculo da Radiação Solar em Superfícies Inclinadas e em Superfícies com Seguimento - Modelo Adoptado	45
4.3.	Avaliação do Recurso solar - Comparações efectuadas	46

4.3.1. Ganhos de radiação solar em superfícies com seguimento comparativamente a superfícies estacionárias com inclinação óptima	49
5. Conclusões e Trabalho Futuro	63
BIBLIOGRAFIA.....	65
ANEXOS.....	67
ANEXO I – Ganho de Radiação Solar em relação à Superfície Horizontal	69
ANEXO II – Quantidade de Radiação Directa existente na Radiação Global	73
ANEXO III – Declinação Solar, Altitude Solar, Nascer e Pôr-do-sol e Comprimento do Dia (Lisboa)	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Efeito fotovoltaico [23].....	3
Figura 2.2 Irradiação anual incidente num plano com inclinação óptima [24]	4
Figura 2.3 Potência fotovoltaica instalada em Portugal a partir de sistemas de microprodução (dados provenientes da DGEG)	5
Figura 2.4 Potência total instalada em Portugal (dados provenientes da DGEG).....	5
Figura 2.5 Sistema fotovoltaico autónomo.....	7
Figura 2.6 Sistema fotovoltaico híbrido	8
Figura 2.7 Sistema fotovoltaico ligado à rede de distribuição	9
Figura 2.8 Células fotovoltaicas	10
Figura 2.9 Ligação de células fotovoltaicas em série [15]	10
Figura 2.10 Ligação de células fotovoltaicas em paralelo [15].....	11
Figura 2.11 Banco de baterias [26]	12
Figura 2.12 Regulador de carga [26].....	13
Figura 2.13 Inversor [26].....	14
Figura 2.14 Agrupamento de painéis fotovoltaicos estacionários [27]	15
Figura 2.15 Centrais fotovoltaicas de Serpa e Amareleja [37].....	16
Figura 2.16 Seguimento azimutal da central fotovoltaica da Amareleja, Portugal [37].....	17
Figura 2.17 Seguimento polar da central fotovoltaica Nellis, EUA [30]	17
Figura 2.18 Seguimento a um eixo horizontal Norte-Sul central fotovoltaica Serpa, Portugal [37].....	18
Figura 2.19 Seguimento solar a dois eixos, Nepal [28].....	18
Figura 2.20 Princípio dos Sistemas concentradores fotovoltaicos [3].....	19
Figura 2.21 Sistema concentrador fotovoltaico [35]	20
Figura 3.1 Núcleo Solar, adaptado de [34].....	22
Figura 3.2 Variação da radiação extraterrestre ao longo do ano [46].....	23
Figura 3.3 Componentes constituintes da radiação solar [35].....	24
Figura 3.4 Movimento de translação da Terra em torno do Sol [14]	25
Figura 3.5 Equação do tempo em minutos ao longo de um ano [7]	26
Figura 3.6 Variação anual da declinação solar [32]	27
Figura 3.7 Ângulo solar horário ao longo de um dia.....	28
Figura 3.8 Ângulos de Zénite Solar (θ_s), Altitude Solar (α_s) e Azimute Solar (γ_s)	28
Figura 3.9 Altitude Solar [36]	29
Figura 3.10 Ângulo do azimute solar [36].....	30
Figura 3.11 Exemplo de piranómetro e pireliómetro [29].....	32
Figura 3.12 <i>Sun tracker</i> para medição da radiação solar [29]	32
Figura 3.13 Radiação solar Incidente em uma superfície horizontal	34
Figura 3.14 Radiação solar Incidente em uma superfície inclinada	35

Figura 3.15 Posição do Sol relativamente a uma superfície inclinada, adaptado de [1]	36
Figura 3.16 Esquema de incidência de radiação em uma superfície, adaptado [7]	39
Figura 4.1 Evolução histórica da energia eléctrica produzida através de energias renováveis (Gwh) em Portugal Continental, Extraído de DGEG, estatísticas rápidas Junho 2011.	41
Figura 4.2 Evolução do peso da produção de cada tecnologia no total de produção de energia renovável em Portugal Continental, Extraído de DGEG, estatísticas rápidas Junho 2011.	42
Figura 4.3 Irradiação Global Horizontal e Difusa Horizontal em Lisboa	43
Figura 4.4 Declinação Solar	44
Figura 4.5 Posição do Sol em Lisboa ao longo de um ano.....	45
Figura 4.6 Radiação solar global horizontal anual	47
Figura 4.7 Rácio de Radiação directa horizontal existente na Radiação global horizontal.....	48
Figura 4.8 Radiação solar global anual incidente num plano estacionário com inclinação óptima	50
Figura 4.9 Ganho de radiação solar com a utilização de uma superfície com seguimento a um eixo horizontal Este-Oeste, em relação à radiação global numa superfície estacionária com inclinação óptima.....	51
Figura 4.10 Radiação solar global anual incidente numa superfície com seguimento a um eixo horizontal Este-Oeste	52
Figura 4.11 Ganho de radiação solar com a utilização de uma superfície com seguimento a um eixo horizontal Norte-Sul, em relação à radiação global numa superfície estacionária com inclinação óptima.....	53
Figura 4.12 Radiação solar global anual incidente numa superfície com seguimento a um eixo horizontal Norte-Sul	54
Figura 4.13 Ganho de radiação solar com a utilização de uma superfície com seguimento azimutal, em relação à radiação global numa superfície estacionária com inclinação óptima	55
Figura 4.14 Radiação solar global anual incidente numa superfície com seguimento azimutal	56
Figura 4.15 Ganho de radiação solar com a utilização de uma superfície com seguimento polar, em relação à radiação global numa superfície estacionária com inclinação óptima	57
Figura 4.16 Radiação solar global anual incidente numa superfície com seguimento polar.....	58
Figura 4.17 Ganho de radiação solar com a utilização de uma superfície com seguimento a dois eixos, em relação à radiação global numa superfície estacionária com inclinação óptima	59
Figura 4.18 Radiação solar anual global incidente numa superfície com seguimento a dois eixos	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Ganho de radiação Solar em relação ao estacionário óptimo	61
Tabela 4.2 Radiação global anual incidente no plano da superfície dos seguimentos	62

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Índice Anisotrópico – Modelo de Hay e Davies
EDT	Equação do Tempo
F'	Índice de claridade Anisotrópico – Modelo de Klucher
G	Irradiância solar
G _{cs}	Constante solar
G _o	Irradiância solar extraterrestre
G _{on}	Radiação extraterrestre normal ao plano
H	Irradiação solar diária
H _o	Irradiação solar diária extraterrestre
$\overline{H}_{h,g}$	Irradiação global horizontal média mensal
\overline{H}_o	Irradiação extraterrestre média mensal
$\overline{H}_{h,d}$	Irradiação difusa horizontal média mensal
I	Irradiação solar horária
I _b	Irradiação solar directa
I _o	Irradiação solar horária extraterrestre
I _{h,g}	Irradiação solar horária global horizontal
I _{h,b}	Irradiação solar horária directa horizontal
I _{h,d}	Irradiação solar horária difusa horizontal
I _{i,g}	Irradiação solar horária global numa superfície inclinada
I _{i,b}	Irradiação solar horária directa numa superfície inclinada
I _{i,d}	Irradiação solar horária difusa numa superfície inclinada
I _{i,d,isso}	Irradiação solar difusa isotrópica
I _{i,d,cs}	Irradiação solar difusa de circumsolar
I _{i,d,bh}	Irradiação solar difusa de horizonte iluminado
I _{i,d,a}	Irradiação solar reflectida do solo
\overline{K}_T	Índice de claridade
L _{st}	Longitude do meridiano de referência para o fuso horário local
L _{loc}	Longitude real do local
n	Dia do ano
r ₀	Distância média da terra ao Sol
R _b	Factor de correcção da radiação directa que atinge uma superfície inclinada
\overline{S}	Horas de brilho do Sol médio mensal
S _o	Número de horas de brilho do Sol diário
t _d	Duração do dia
TLo	Tempo do relógio local
t _{sn}	Tempo do nascer do Sol

t_{sp}	Tempo do Pôr-do-sol
TSV	Tempo Solar Verdadeiro
UA	Unidade astronómica
α_s	Altitude solar
β	Ângulo de inclinação da superfície
γ	Ângulo de orientação da superfície
γ_s	Azimute solar
Γ	Ângulo do dia
δ	Declinação solar
ε	Excentricidade da terra
θ	Ângulo solar de incidência entre a normal da superfície e os raios solares
θ_s	Zénite solar
λ	Longitude
ϕ	Latitude
ω_s	Ângulo horário
$\omega_{s,nascer}$	Ângulo do nascer do Sol
$\omega_{s,pôr}$	Ângulo do Pôr-do-sol

LISTA DE ABREVIATURAS

ca	Corrente Alternada
cc	Corrente Contínua
ddp	Diferença de Potencial
DGEG	Direcção Geral de Energia e Geologia
IM	Instituto de Meteorologia
SFA	Sistemas fotovoltaicos autónomos
SCF	Sistemas concentradores fotovoltaicos
SFH	Sistemas fotovoltaicos híbridos
SF	Sistemas fotovoltaicos
SFLR	Sistemas fotovoltaicos ligados rede Eléctrica
UE	União Europeia
WRC	<i>World Radiation Center</i>

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Desde o início da humanidade que esta consome recursos energéticos para a sua própria sobrevivência e desenvolvimento. Depois da revolução industrial, em meados do século XVIII, o impacto da actividade humana sobre o meio ambiente tornou-se mais expressivo. O aumento demográfico e as necessidades daí adjacentes, sobretudo nos países desenvolvidos, originaram problemas ambientais cuja resolução é o desafio de cidadãos, organizações e governos de toda a humanidade desde o fim do século passado.

Grande parte desta problemática está relacionada com a exploração e utilização de energia, pois trata-se do factor essencial para a vida e desenvolvimento das sociedades modernas. O crescente consumo de energia e a sua produção, provoca sérios impactos no ambiente. A poluição, as chuvas ácidas, o aquecimento global e por consequência a destruição da fauna e flora são algumas das consequências do consumo desmedido de recursos energéticos.

A consciência do Homem para este acontecimento é cada vez maior e, neste sentido, as políticas ambientais têm vindo a ser desenvolvidas e a tornar-se cada vez mais rigorosas. O tema energia adquiriu uma maior importância. Tornou-se evidente que a utilização de hidrocarbonetos como fonte dos recursos energéticos não se enquadra à exigência de um desenvolvimento “sustentável”.

Actualmente para temas como as alterações climáticas, gestão de resíduos e a utilização racional dos recursos energéticos, existem políticas nacionais e europeias que visam alterar esta tendência negativa.

Os desafios impostos pela necessidade de implementar políticas que assegurem um crescimento sustentável são especialmente pertinentes no domínio da energia. Cada vez mais somos confrontados com a exigência de encontrar nas energias renováveis uma alternativa real e fiável às formas convencionais de produção de energia eléctrica, responsáveis por sérias ameaças ao ambiente.

As obrigações legais impostas pelas directivas comunitárias e pelo Acordo de Quioto apenas reforçam essa necessidade. A energia eólica e fotovoltaica, entre outras, abrange um potencial energético enorme, que pode cooperar de forma expressiva para as carências crescentes de energia a um nível global.

Da União Europeia (UE) e da sua política das energias renováveis destaca-se: em 1997 o *White Paper* que aumentou a quota de energias renováveis de 6 para 12% do total de consumo de energia até 2010; a Directiva 2001/77/CE que estabeleceu uma meta de 21% de electricidade produzida a partir de fontes de energias renováveis no consumo total de electricidade da Comunidade em 2010. O Roteiro das Energias Renováveis COM(2006)848 preparou o caminho para a nova directiva relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis, realçando a importância da liderança da UE em matéria de energias renováveis, sugerindo e fundamentando uma nova meta de energias renováveis no consumo energético da UE em 2020. A nova Directiva 2009/28/CE estabelece então o objectivo de se atingir os 20% de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final de energia na UE em 2020.

Quanto à estratégia Portuguesa sobre a energia proveniente de fontes renováveis, esta segue a legislação europeia e completa-a com a legislação nacional que estabelece metas e dá orientações mais específicas. A nível europeu a Directiva 2001/77/CE estabeleceu que até 2010 39% da produção eléctrica nacional deveria ser obtida através de fontes renováveis, contudo o PNALE II actualizou esta meta para 45%. Por sua vez a Directiva 2009/28/CE estabeleceu uma nova meta para a quota de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final de energia em 2020 de 31%, incluindo não só a produção de electricidade mas também o aquecimento e arrefecimento e os transportes.

A conjuntura energética da era pós-Quito transforma as energias sustentáveis e não poluentes num enorme desafio. O objectivo enunciado na estratégia energética europeia de duplicação da sua quota ultrapassa o simples desejo tornando-se numa necessidade.

1.2. Objectivos

Este estudo teve como principais objectivos:

- Apresentar o estado da arte de dos sistemas fotovoltaicos, com referência aos equipamentos constituintes de uma instalação genérica.
- Explicar os conceitos gerais envolvidos na relação do sistema de geometria Terra-Sol, na propagação de radiação solar e na relação existente entre a radiação solar incidente numa superfície horizontal e a radiação solar incidente numa superfície inclinada.
- Desenvolvimento de um modelo de simulação de sistemas fotovoltaicos em superfícies inclinadas e em superfícies com seguimento solar, com base em dados horários estimados de radiação solar global horizontal e difusa horizontal, ao longo de um ano genérico em várias cidades de Portugal continental.
- Avaliar o recurso solar existente em superfícies horizontais, comparativamente a superfícies inclinadas e a superfícies com seguimento solar.
- Elaborar mapas nacionais de radiação solar incidente em superfícies com seguimento solar e em superfícies estacionárias com inclinação óptima.

1.3. Estrutura da Dissertação

Esta Dissertação está organizada em cinco capítulos onde se descrevem as diferentes fases que constituíram todo o trabalho desenvolvido.

No primeiro capítulo – “Introdução” – são enunciados os objectivos da Dissertação e metodologias associadas ao seu desenvolvimento. Para além de se efectuar um enquadramento do objecto de estudo, de forma a contextualizar e salientar a preocupação a nível quase global relativamente ao estado do actual meio ambiente, é também referida a importância que a UE dá ao conhecimento e aplicação de fontes de energias renováveis, como resposta às carências energéticas a um nível global. É também referida a estratégia portuguesa relativamente à energia proveniente de fontes renováveis.

No segundo capítulo – “Energia Fotovoltaica – Estado da Arte” – refere-se aos conceitos básicos relacionados com a energia fotovoltaica. São apresentadas as principais características dos sistemas fotovoltaicos, bem como introduzidos os conceitos relacionados com os sistemas de seguimento solar.

No terceiro capítulo – “Estudo da Radiação Solar” – refere-se os conceitos necessários conhecer para se efectuar o estudo da radiação solar e para a metodologia desenvolvida.

No quarto capítulo – “Aplicação da Metodologia Desenvolvida e Discussão dos Resultados Obtidos” – explica-se a aplicação da metodologia desenvolvida e apresentam-se os resultados obtidos no decurso deste estudo.

No quinto capítulo – “Conclusões e Trabalho Futuro” expõem-se todas as conclusões obtidas ao longo do presente estudo e propõem-se alguns tópicos para trabalho futuro.

2. A Energia Fotovoltaica – Estado da Arte

2.1. Energia solar e o efeito fotovoltaico

É nos painéis solares que é efectuada a conversão da radiação solar em electricidade, tal como demonstra a Figura 2.1. Esta conversão deve-se ao efeito fotovoltaico, um princípio físico que converte a energia de fotões em electricidade. Consiste no aparecimento de uma diferença de potencial (ddp) nos extremos de uma estrutura de material semiconductor. Esta ddp é produzida pela absorção de luz e posterior libertação de electrões. Quando os electrões libertados são capturados, verifica-se a criação de um fluxo de electrões que não é mais que a criação de uma corrente contínua (cc) nos terminais da célula, que poderá ser utilizada como electricidade.

A verdadeira compreensão deste fenómeno levou cerca de cem anos a esclarecer, sendo que o processo de produzir corrente eléctrica a partir do efeito fotovoltaico já tinha sido relatado em 1839 por *Edmond Becquerel*.

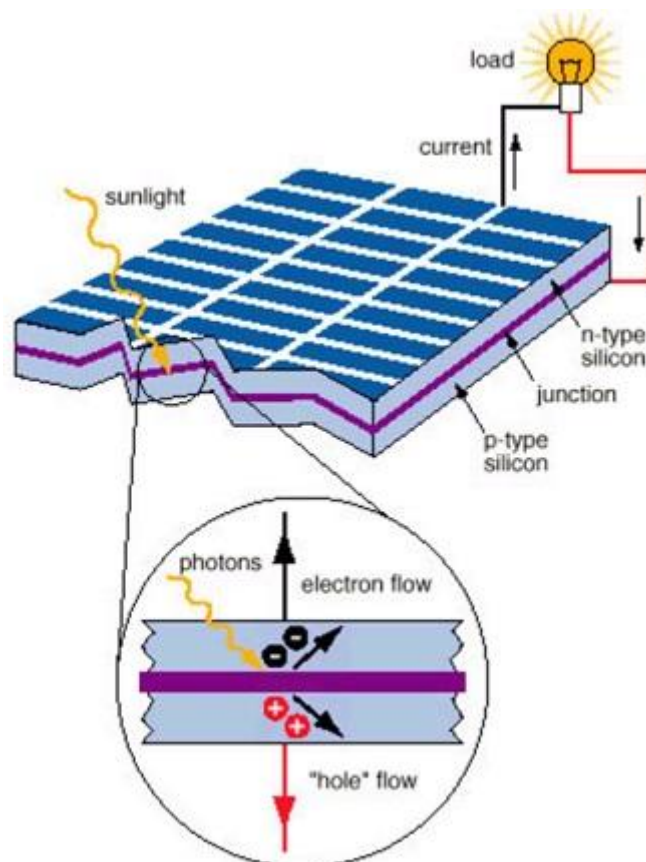


Figura 2.1 Efeito fotovoltaico [23]

2.2. O aproveitamento da energia fotovoltaica em Portugal

Até à data da elaboração deste trabalho desconhece-se qualquer existência no subsolo português de combustíveis de origem fóssil, tornando o país fortemente dependente da importação de combustíveis para abastecimento energético e ficando assim vulnerável à volatilidade dos mercados energéticos internacionais. Por outro lado, Portugal é um país com grandes recursos energéticos renováveis, como é o caso da energia eólica e particularmente da energia solar que atinge em Portugal níveis energéticos dos mais elevados da Europa.

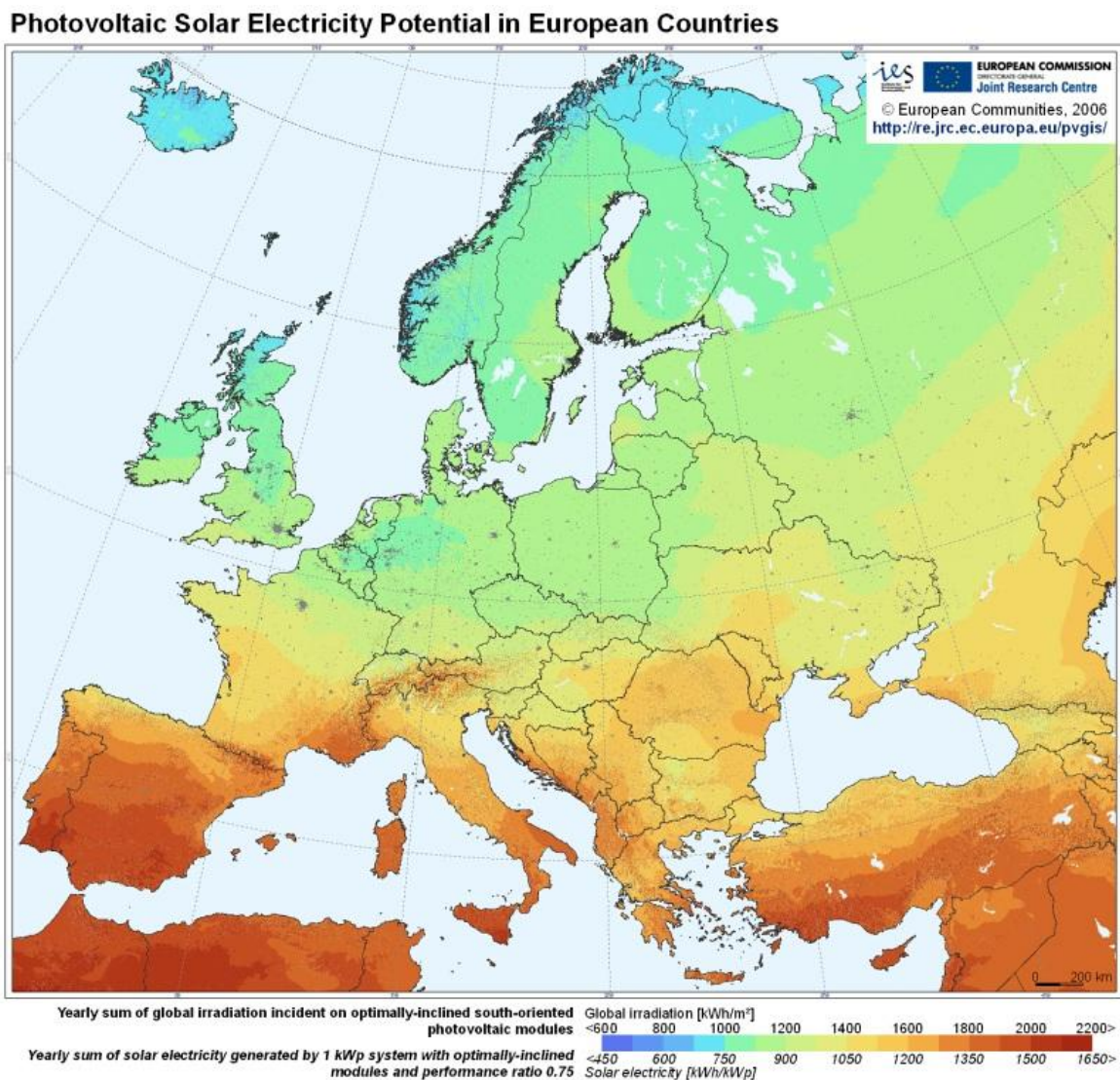


Figura 2.2 Irradiação anual incidente num plano com inclinação óptima [24]

A estratégia portuguesa para aproveitamento da energia proveniente de fontes de renováveis, segue a legislação europeia e complementa-a com legislação nacional, que estabelece metas e dá orientações bem específicas.

De forma a responder a estas solicitações, foram criados alguns programas de apoio governamentais para o aproveitamento dos recursos enérgicos renováveis, como é o caso das “Renováveis na hora”.

A partir de dados obtidos da Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG), elaborou-se a Figura 2.3 referente à evolução da potência fotovoltaica instalada em Portugal para sistemas de microprodução e a Figura 2.4 que indica a globalidade de potência fotovoltaica instalada em Portugal.

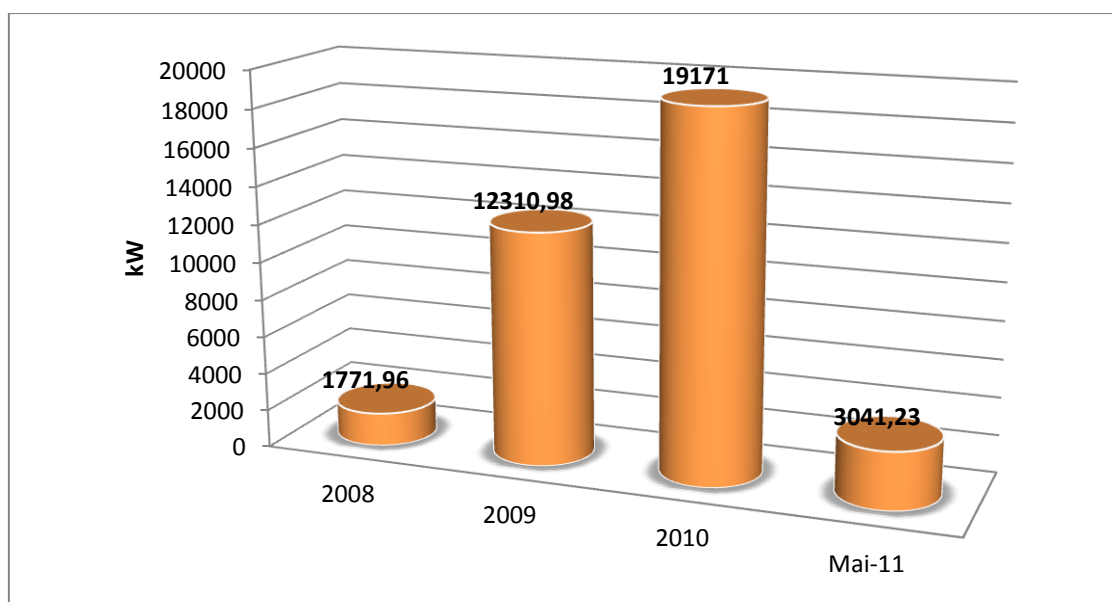


Figura 2.3 Potência fotovoltaica instalada em Portugal a partir de sistemas de microprodução (dados provenientes da DGE)

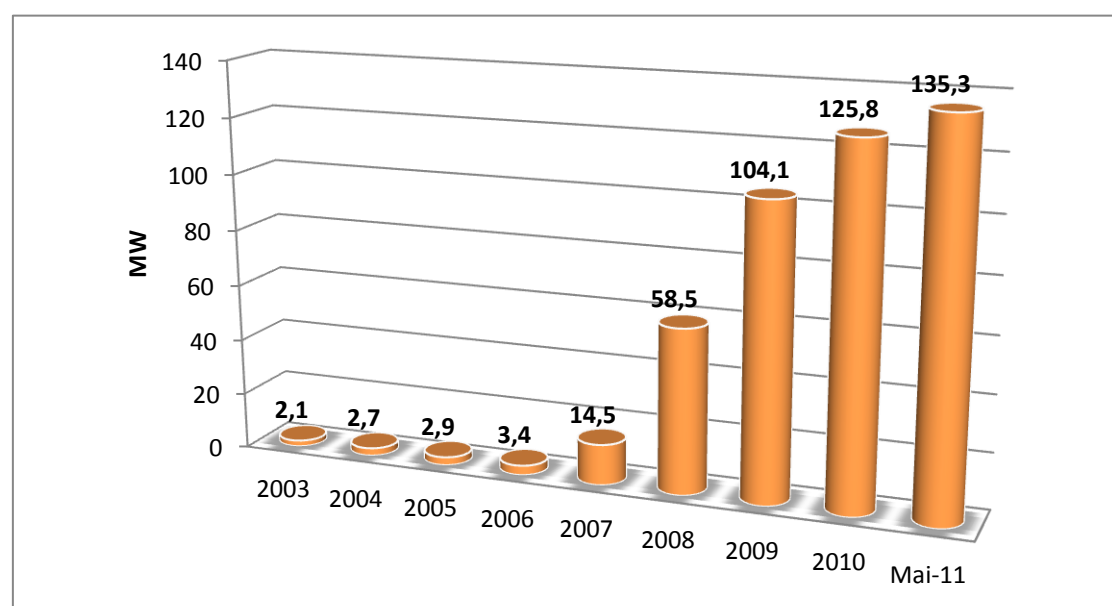


Figura 2.4 Potência total instalada em Portugal (dados provenientes da DGE)

2.3. Sistemas e aplicações fotovoltaicas

O mais simples sistema fotovoltaico é composto pelo conjunto de uma célula fotovoltaica e uma qualquer carga eléctrica. No entanto, a grande maioria dos sistemas fotovoltaicos (SF) necessita na sua constituição de outros componentes que proporcionam energia eléctrica com as características exactas para o funcionamento dos mais variados equipamentos, mesmo quando a radiação solar é deficiente ou até mesmo inexistente. A aplicação de qualquer tipo de SF depende directamente da finalidade que se pretende dar, da avaliação económica e das características específicas do projecto.

Os SF podem ser classificados em dois tipos: os sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA), com uma provável variante de sistemas fotovoltaicos híbridos (SFH) e os sistemas fotovoltaicos ligados à rede eléctrica de distribuição (SFLR).

Na primeira situação, o aproveitamento da energia solar carece de ser ajustado à necessidade energética, uma vez que a energia produzida não equivale na maior parte das vezes à procura pontual de energia de um qualquer consumidor. É indispensável a utilização de um sistema de armazenamento e muitas vezes de apoios complementares de produção de energia.

No caso dos SFLR não se utiliza qualquer equipamento para armazenamento de energia pois a própria rede funciona como um acumulador de energia eléctrica.

2.3.1. Sistemas fotovoltaicos autónomos

Na Figura 2.5 é possível observar um esquema de um SFA. Este tipo de sistemas iniciou o campo de actuação económica da tecnologia fotovoltaica. A utilização deste tipo de sistema de produção de energia eléctrica efectua-se especialmente em zonas onde o fornecimento de energia pela rede pública de distribuição não é praticável por razões de índole técnica e/ou económica.

Estes sistemas armazenam energia para compensar o desfasamento existente no tempo entre a produção e a procura de energia eléctrica. Este armazenamento pode ser efectuado de diversos métodos, o mais comum utiliza baterias recarregáveis como acumuladores de energia.

De uma forma geral os componentes que constituem um sistema autónomo são:

- Gerador/Painel fotovoltaico;
- Regulador de carga;
- Bateria (s);
- Inversor.

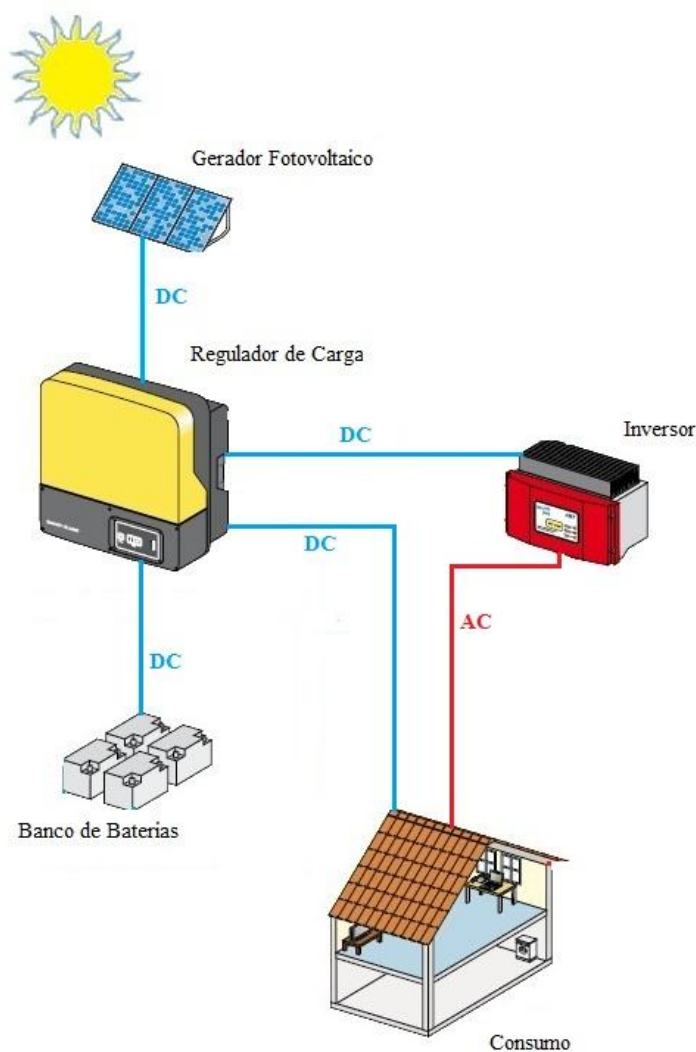


Figura 2.5 Sistema fotovoltaico autónomo

2.3.1.1. Sistemas fotovoltaicos híbridos

Como referido anteriormente, os SFH são uma variante dos SFA. Como é possível verificar na Figura 2.6, estes consistem na combinação de SFA com outras fontes de energia para assim assegurar a carga das baterias na ausência de radiação solar. As fontes de energia auxiliares podem ser de origens díspares, desde energia das ondas, geradores eólicos, a diesel, a gás, a gasolina, entre outros.

Devido à maior complexidade deste tipo de sistemas, é necessária a aplicação de equipamentos de controlo mais sofisticados e eficientes para uma correcta integração das várias formas de produção de energia eléctrica e para uma máxima eficiência na sua distribuição aos consumidores.

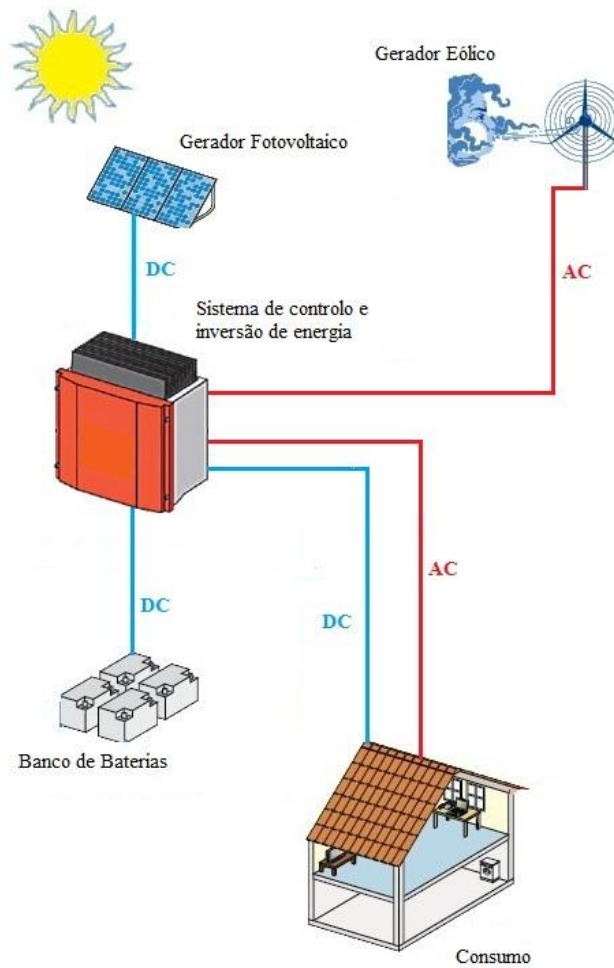


Figura 2.6 Sistema fotovoltaico híbrido

2.3.2. Sistemas fotovoltaicos ligados à rede

Como se pode verificar pela análise da Figura 2.7, este tipo de sistema é caracterizado por produzir directamente para a rede eléctrica convencional. Neste sistema toda a energia produzida é entregue à rede que assim funciona como acumulador.

A quantidade de SLFR tem vindo a crescer expressivamente, impulsionados por incentivos governamentais. Estes programas de apoio incentivam a aplicação destes sistemas, como é o caso em Portugal com a microprodução e a miniprodução.

A utilização em larga escala destes sistemas de produção descentralizada de energia eléctrica, tem algumas vantagens do ponto de vista das empresas distribuidoras de electricidade. Verifica-se uma redução dos gastos na transformação e transporte de energia eléctrica, desde a central descentralizada até ao consumidor final. Estas mais-valias são alcançadas pois o local da produção e consumo da energia eléctrica é o mesmo.

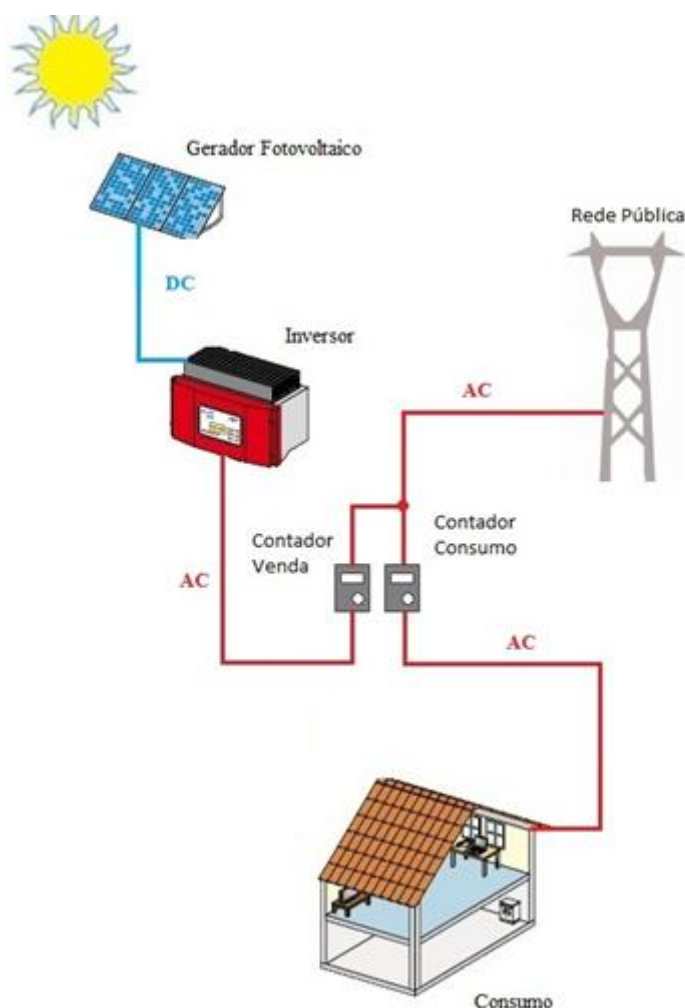


Figura 2.7 Sistema fotovoltaico ligado à rede de distribuição

Nos sistemas fotovoltaicos e em qualquer instalação técnica especial, uma boa interligação dos componentes que os constituem são uma base sólida para um projecto/instalação bem conseguido. É fundamental uma rigorosa avaliação técnica de todos os possíveis componentes, devendo-se estudar criteriosamente todos equipamentos a aplicar para um bom conhecimento de todos os parâmetros técnicos que os caracterizam e qualificam. Este estudo é deveras importante em qualquer projecto pois ganha-se um conhecimento valorizado das suas limitações técnicas e das suas aplicabilidades.

2.4. Componentes de um sistema fotovoltaico

2.4.1. Células fotovoltaicas

Como referido anteriormente, fotovoltaico consiste na transformação directa da luz em energia eléctrica, recorrendo-se a células solares. Neste processo, são utilizados materiais semicondutores como o silício, o arseneto de gálio, telureto de cádmio ou disseleneto de cobre e índio. A célula de silício cristalino é a mais comum. Actualmente, cerca de 95% de todas as células solares do mundo são de silício [12]. A Figura 2.8 representa uma célula fotovoltaica.

A célula solar clássica de silício cristalino, é composta por duas camadas de silício dopadas com diferentes impurezas. A camada orientada para o Sol está dopada negativamente com fósforo (região tipo n) e a camada inferior está dopada positivamente com boro (região tipo p). É produzido um campo eléctrico na junção das duas camadas, que conduz à separação das cargas libertadas pela radiação solar. Para existir produção de electricidade é necessária a aplicação de ligações eléctricas nas partes anterior e posterior da célula fotovoltaica.



Figura 2.8 Células fotovoltaicas

Ao juntar as camadas n e p dos semicondutores impuros forma-se uma região de transição denominada junção p-n, onde é criado um campo eléctrico que separa os portadores de carga que a atingem. Quando uma célula solar é exposta à luz, os fotões são absorvidos pelos electrões. Assim, quando o fotão contém energia suficiente a ligação entre os electrões é quebrada e estes movem-se para a banda de condução e são conduzidos através do campo eléctrico para a camada n. As lacunas criadas seguem para a camada p. Tal como se verifica na Figura 2.1, quando se ligam os terminais da célula a um circuito exterior que se fecha através de uma carga irá circular corrente eléctrica.

As células fotovoltaicas produzem uma tensão e corrente de saída baixas. Para se contrariar esta dificuldade técnica, agrupam-se várias células para se formar módulos/painéis fotovoltaicos. Estes painéis são organizados de forma a responderem às necessidades da sua aplicação, os denominados agrupamentos em série ou em paralelo.

Num agrupamento ligado em série, obtém-se a adição das tensões aos terminais das células para um mesmo valor de corrente, como se verifica na Figura 2.9.

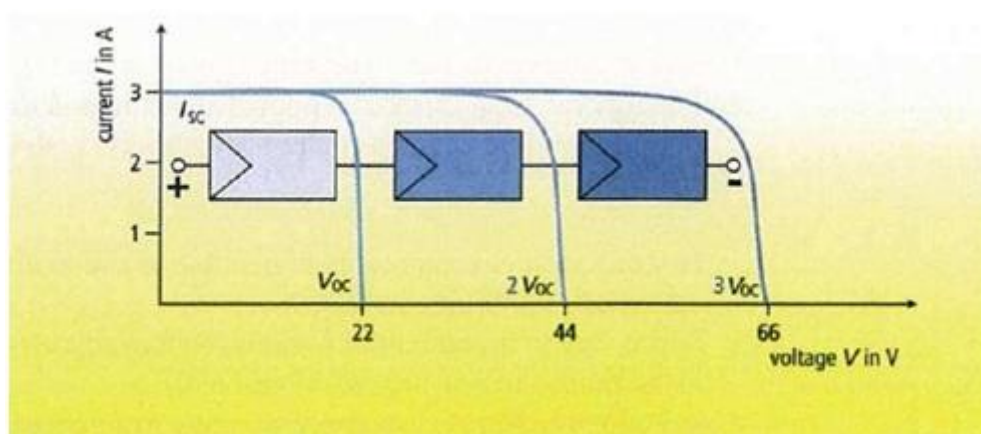


Figura 2.9 Ligação de células fotovoltaicas em série [15]

Num agrupamento ligado em paralelo, obtém-se a adição de correntes para um mesmo valor de tensão, como se verifica na Figura 2.10.

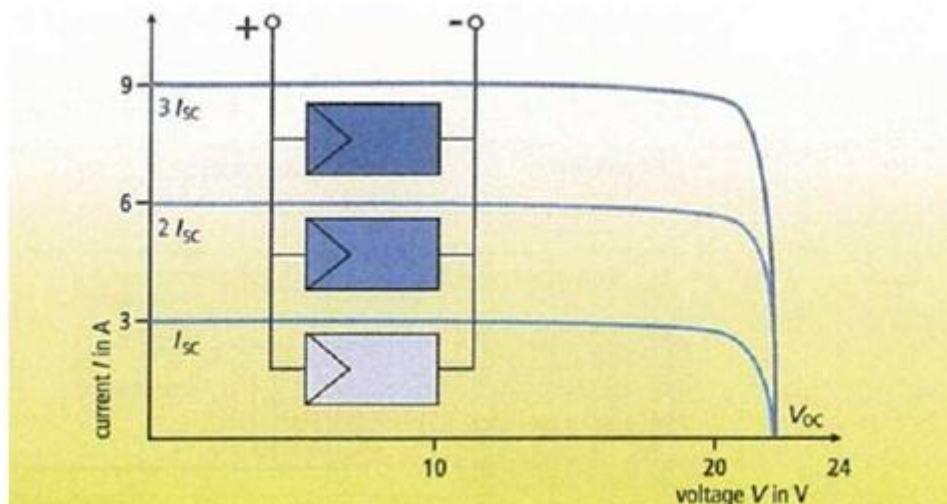


Figura 2.10 Ligação de células fotovoltaicas em paralelo [15]

2.4.2. Armazenamento de energia

O armazenamento de energia eléctrica é o ponto central do aproveitamento de energia nos SFA, pois não existe coincidência entre a produção e o consumo de energia ao longo do ano. Esta particularidade obriga a utilização de acumuladores. A Figura 2.11 exemplifica tipos de acumuladores.

De um modo geral, um bom sistema de armazenamento deve ter:

- Baixo custo;
- Alto rendimento;
- Tempo de vida útil considerável;
- Manutenção reduzida.

Entre os sistemas de armazenamento que potencialmente podem ser utilizados destacam-se entre outros, os acumuladores electroquímicos e a produção de hidrogénio recorrendo à hidrólise da água.

Também chamadas de baterias, os acumuladores electroquímicos são a mais importante forma de armazenamento de energia que pode ser utilizada, especialmente devido à maturação da tecnologia. Estas baterias transformam directamente energia eléctrica em energia química e posteriormente convertem a energia química em eléctrica.

As baterias podem ser classificadas em duas categorias, primária e secundária. As baterias primárias não podem ser recarregadas uma vez esgotados os reagentes que produzem energia eléctrica. Contrariamente, as secundárias podem ser recarregadas e assim reutilizadas.



Figura 2.11 Banco de baterias [26]

2.4.3. Controladores/reguladores de carga

Nos SFA, a tensão à saída do agrupamento de módulos fotovoltaicos tem que ser compatível com a tensão verificada no barramento das baterias (12V, 24V ou 48V). Na prática e para existir um carregamento das baterias, a tensão fornecida pelos módulos tem que ser ligeiramente superior ao verificado no barramento das baterias. A Figura 2.12 exemplifica um regulador de carga.

Existem vários tipos de reguladores/controladores de carga. O regulador mais simples controla/monitoriza constantemente a tensão do grupo de baterias. Quando a referida tensão alcança um valor para o qual se considera que a bateria se encontra carregada (aproximadamente 14,4 Volts para uma bateria de chumbo ácido de 12 Volts nominais) o regulador interrompe o processo de carga. Quando o consumo provoca o descarregamento da bateria e por consequente a diminuição da sua tensão de saída, o controlador volta a interligar o gerador à bateria reiniciando o ciclo de carregamento.

As principais funções de um controlador/regulador de carga são:

- Assegurar uma boa carga do acumulador;
- Protecção contra sobrecargas do acumulador;
- Prevenção de descargas indesejáveis do acumulador;
- Bloquear corrente inversa entre a bateria e o painel.



Figura 2.12 Regulador de carga [26]

2.4.4. Inversores CC/CA

Os inversores têm a finalidade de transformar uma corrente contínua (cc) em corrente alternada (ca) monofásica ou trifásica com características de frequência e tensão adequadas para a sua ligação. Como os módulos fotovoltaicos são produtores de corrente contínua, para aplicar qualquer carga que necessite de alimentação de corrente alternada, tem que se utilizar um inversor CC/CA. A Figura 2.13 exemplifica um inversor.

Nos caso dos SFLR, os inversores a aplicar têm como função adaptar a produção à rede eléctrica convencional.

Os vários inversores existentes no mercado e utilizados em SF têm algumas das seguintes características:

- Seguimento do Ponto de Potencia Máxima através do controle da corrente e tensão, efectua ajustes para que os módulos fotovoltaicos mantenham a sua produção perto do valor de pico;
- Converter a corrente CC produzida pelo painel fotovoltaico em ca;
- Retirar da rede o sistema fotovoltaico caso verifique que os níveis de corrente, tensão ou frequência não estejam dentro da faixa aceitável dos padrões da rede eléctrica ou do lado da produção; o inversor deve ainda isolar o gerador PV da rede quando se verifique que não existe energia na rede, seja por falha ou operações de manutenção, diminuindo assim o risco de contactos directos ou indirectos;
- Alguns inversores podem registar os parâmetros de funcionamento de ca, cc, tensão, corrente, frequência e energia diária acumulada ou entregue à rede.



Figura 2.13 Inversor [26]

2.5. Sistemas fotovoltaicos estacionários e de seguimento

Devido ao incremento das necessidades energéticas mundiais e com a crescente preocupação com o estado do meio ambiente, todas as formas de produção renovável de energia eléctrica têm que ser consideradas e mais que isso, devem ser a principal fonte de fornecimento de energia eléctrica.

Dentro dos tipos de energias renováveis existentes temos a energia solar. Esta pode ser aproveitada com a aplicação de painéis solares fotovoltaicos que é um dos métodos de aproveitamento da energia proveniente do Sol.

Usualmente pensa-se em painéis solares fotovoltaicos estacionários numa posição fixa. Contudo existem também painéis com seguimento, isto é, sistemas que seguem o sol no seu percurso, pois este movimenta-se/desloca-se todos os dias de Este para Oeste e viaja de Norte para Sul conforme as estações do ano, pelo menos na óptica terrestre.

Sendo o Sol uma fonte inesgotável de energia, comparativamente à idade do Homem, deve-se tentar usufruir deste recurso energético grátis, renovável, não poluente e principalmente disponível para todos. No entanto existem algumas restrições à sua utilização, nomeadamente, essa disponibilidade energética não é uniforme a nível global pois dependente da posição geográfica.

A utilização deste tipo de sistemas poderá ser uma mais-valia interessante para os denominados países em vias de desenvolvimento, pois a sua aplicação não necessita de um grande investimento para um emprego descentralizado.

2.5.1. Painéis fotovoltaicos estacionários

A integração de sistemas fotovoltaicos estacionários em edifícios está presentemente em voga em muitos países industrializados. Esta utilização tem levado à aplicação de diferentes orientações e inclinações nos sistemas fotovoltaicos. Os módulos fotovoltaicos são ajustados às características geográficas do local com a intenção do aproveitamento máximo da energia disponível, existindo variações na orientação de Este para Oeste e na inclinação de horizontal para vertical.

Em Portugal verificou-se um crescimento nas instalações de sistemas fotovoltaicos estacionários nos últimos anos. Grande parte desse crescimento deve-se às instalações de sistemas de micro produção no âmbito do apoio governamental, “Renováveis na hora”.

A desvantagem existente é que a energia produzida pelos sistemas estacionários não se pode comparar aos sistemas de seguimento, tal como anteriormente referido, mesmo no caso de um sistema estacionário com a inclinação óptima.



Figura 2.14 Agrupamento de painéis fotovoltaicos estacionários [27]

No entanto, um nicho de mercado que desponta é o da integração de sistemas fotovoltaicos em edifícios. Qualquer superfície de um edifício que esteja exposta à radiação solar, torna-se num potencial candidato à integração de módulos fotovoltaicos.

A integração de módulos fotovoltaicos num edifício pode ser feita de várias formas, em fachadas, átrios, clarabóias e dispositivos solares de sombreamento.

Os módulos aplicados podem resultar em duas formas de aproveitamento de energia consoante a sua aplicação: um método activo, que deriva das características inatas do módulo que é de produtor de energia eléctrica, e o outro passivo resultando num possível sombreamento.

2.5.2. Sistemas fotovoltaicos com seguimento

O maior entrave para o aproveitamento da energia proveniente do Sol é que este se movimenta. Os seguidores solares tentam resolver essa dificuldade; seguem o sol de forma a permitir que os painéis neles instalados possam aproveitar mais correctamente e eficientemente a radiação proveniente e assim aumentar a produção de energia eléctrica. Estes sistemas de seguimento podem ser a um eixo ou a dois eixos. Nos próximos subcapítulos iremos falar de sistemas de seguimento solar e das suas particularidades.

Os benefícios de utilização de sistemas fotovoltaicos com seguimento são um facto. De acordo com [35], a utilização de sistemas fotovoltaicos com seguimento poderá permitir um aumento na produção de energia entre 20% a 40%, já [13] indica que um sistema com seguimento a dois eixos e em relação a um painel estacionário com orientação óptima poderá chegar a uma produção de mais 30% de energia eléctrica proveniente do Sol.

A chave para a compreensão dos benefícios do seguimento solar, é o entendimento do significado do ângulo de incidência, o ângulo a que o raio solar incide no painel fotovoltaico. Idealmente os raios solares devem ser perpendiculares aos painéis, ou seja, deve-se criar um ângulo de 90° para um máximo rendimento.

Apesar de existir já alguma aplicação de mecanismos de seguimento em painéis fotovoltaicos, é intenção futura que essa aplicação seja muito mais comum. Actualmente está maioritariamente associado a grandes centrais fotovoltaicas com ligação à rede de distribuição, onde esses mecanismos já demonstram elevados benefícios e consistência. Um exemplo prático da durabilidade de um sistema

fotovoltaico com seguimento é a central de Toledo, que trabalha à aproximadamente 66000 horas, a 100% da sua potência instalada de 100 kWp desde 1994 [21].

Em Portugal temos alguns exemplos de grandes centrais fotovoltaicas Figura 2.15, como é o caso da central de Serpa, com 11 MWp instalados e a central da Amareleja com 45,78MWp instalados. Em ambas as centrais e à data da elaboração deste trabalho, não existiam dados relativos às horas de funcionamento.



Figura 2.15 Centrais fotovoltaicas de Serpa e Amareleja [37]

Assim como os investigadores procuram um maior retorno dos seus investimentos, os seguidores solares ganham maior protagonismo e popularidade. Algumas consultoras energéticas prevêem a utilização de sistemas de seguimento do Sol em pelo menos 85% das instalações comerciais até 2012 [4].

2.5.2.1. Seguimentos solar a um eixo

Devido à evolução tecnológica e científica e pela contínua procura do melhor rendimento possível, actualmente é possível executar o seguimento solar a um eixo de quase todas os métodos imagináveis. Apesar da vasta e ampla diversidade de seguimentos a um eixo, existe um conjunto de seguimentos que são considerados os mais comuns. Nestes verificam-se mais-valias produtivas, maior aproveitamento do sol, menor custo de implementação devido aos sombreamentos e ao espaçamento em agrupamentos de painéis. Esses seguimentos são, o azimutal, o seguimento de eixo horizontal com orientação Norte-Sul e Este-Oeste e o seguimento polar.

Como se pode verificar na Figura 2.16, o seguimento a um eixo azimutal roda em redor do seu eixo vertical, de tal modo que o azimute da superfície do painel fotovoltaico está constantemente de acordo com o azimute do Sol. Por sua vez a inclinação do painel permanece constante. Neste tipo de seguimento o ângulo de incidência da radiação solar no painel, é equivalente à diferença entre o ângulo do zénite solar e o ângulo da inclinação do painel. Torna-se compreensível que a quantidade de radiação colectada depende da inclinação da superfície do painel, sendo máxima para um valor próximo da latitude [21]. Um seguimento azimutal com uma inclinação equivalente à latitude do local aproveita perto de 95% da radiação anual em relação à situação do seguimento a dois eixos.

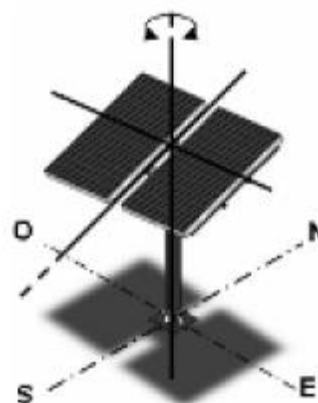


Figura 2.16 Seguimento azimutal da central fotovoltaica da Amareleja, Portugal [37]

Outra configuração comum é o seguimento polar observado na Figura 2.17, que é quando o eixo do seguidor é inclinado até à latitude do local e, deste modo, o eixo de rotação do sistema é paralelo ao eixo de rotação da terra. Neste seguimento solar também se obtém uma produção de radiação próxima dos 95% em comparação com um seguidor a dois eixos [21].

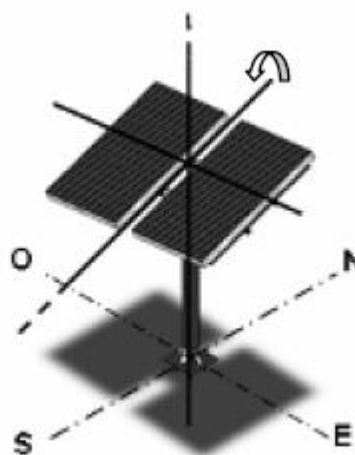


Figura 2.17 Seguimento polar da central fotovoltaica Nellis, EUA [30]

Os seguidores de um eixo horizontal Norte-Sul e Este-Oeste são de construção simples e, em ambos os casos, a radiação solar produzida e comparada com o seguimento a dois eixos, não se aproxima dos valores obtidos com os anteriores seguimentos. Estes seguidores rodam sobre um eixo horizontal Norte-Sul ou Este-Oeste; os painéis são instalados paralelamente ao eixo de rotação (Figura 2.18).

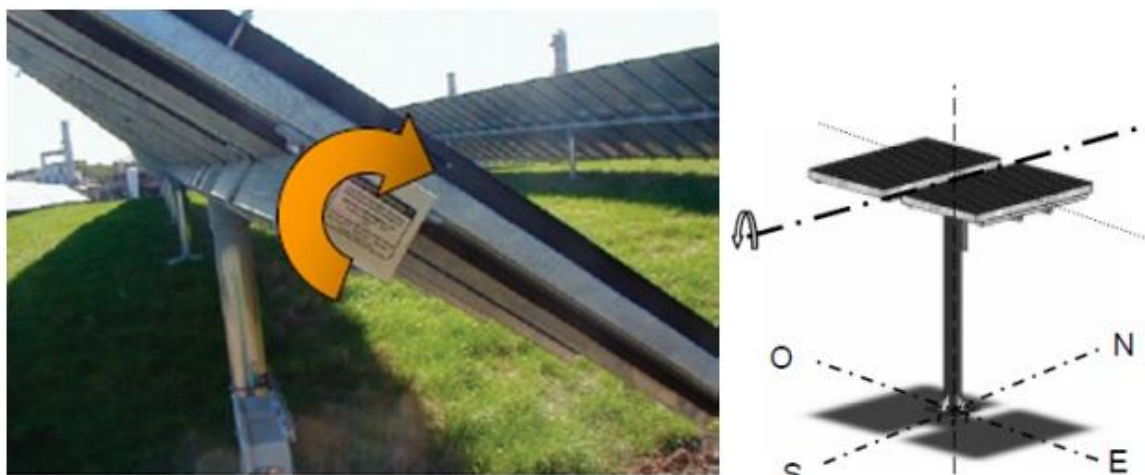


Figura 2.18 Seguimento a um eixo horizontal Norte-Sul central fotovoltaica Serpa, Portugal [37]

2.5.2.2. Seguimento solar a dois eixos

Apesar de elevados fundos serem aplicados em investigação para tentar aumentar a eficiência das células fotovoltaicas em escassos pontos de percentagem, já existe actualmente uma solução real e disponível: os sistemas de seguimento solar a dois eixos. Esta solução poderá possibilitar um aumento de algumas dezenas de pontos percentuais da energia produzida a partir de sistemas fotovoltaicos.

Um correcto alinhamento de um sistema de seguimento solar a dois eixos poderá produzir cerca de 40% mais energia do que um sistema estacionário com inclinação óptima. Isto deve-se ao facto de existir um seguimento tanto a nível do azimute como do zénite, ou seja, um seguidor a dois eixos segue o solar diariamente e em qualquer estação do ano, sempre com um posicionamento óptimo relativamente ao Sol, Figura 2.19. Este posicionamento óptimo significa que o seguidor mantém a superfície receptora sempre perpendicular ao Sol permitindo, deste modo aproveitar a máxima quantidade de energia.

No entanto, é dispendioso a implementação deste tipo de seguimentos, pois são utilizados mecanismos relativamente complicados e que ocupam um espaço razoável devido ao sombreamento. Estas razões influenciam a aplicação dos sistemas de seguimento a um eixo acima descritos em opção ao seguimento a dois eixos [21].



Figura 2.19 Seguimento solar a dois eixos, Nepal [28]

2.5.3. Limitações do seguimento solar

Os grandes sistemas fotovoltaicos têm várias linhas de módulos instalados acima do solo. A distância entre as filas de módulos afecta a energia produzida pelos geradores fotovoltaicos. Quanto mais perto as linhas de módulos estiverem umas das outras, mais cedo se irá verificar sombreamento de uns painéis sobre outros. No caso em que essa separação aumenta, o sombreamento produzido será reduzido e como consequência mais energia será produzida. Contudo, esta simples alteração acarreta um aumento dos custos. Uma grande separação conduz a uma maior ocupação geográfica, maior quantidade de cablagem e mais custos referentes aos trabalhos de engenharia civil.

Estas dificuldades obrigam à existência de um planeamento e de um projecto criterioso relativamente à separação óptima entre painéis, de forma a reduzir ao máximo gastos/perdas desnecessárias, de forma a dar a maior razão possível entre produção de energia e baixo custo.

Existem também opiniões que indicam que sistemas com seguimento necessitam de mais área de implementação em relação a sistemas estáticos. No entanto essa opinião não é necessariamente verdadeira quando se trata de seguimentos horizontais a um eixo [21].

Outra das grandes desvantagens de um sistema com seguimento é que para este se efectuar têm que existir peças móveis, e estas necessitam de uma manutenção preventiva, tal como de uma reparação ou substituição de partes danificadas. Além disso, como para seguir o Sol é necessário um mastro vertical este tem que estar correctamente projectado para resistir às grandes pressões do vento.

Na eventualidade do mecanismo de seguimento deixar de funcionar, o sistema fotovoltaico poderá ficar imobilizado numa posição muito desfavorável e assim reduzir consideravelmente a radiação captada durante o período da imobilização até à sua reparação.

2.5.4. Sistemas concentradores fotovoltaicos

O princípio dos sistemas concentradores fotovoltaicos (SCF) é o da utilização de lentes ou espelhos para concentrar a radiação solar em pequenas células fotovoltaicas, Figura 2.20.

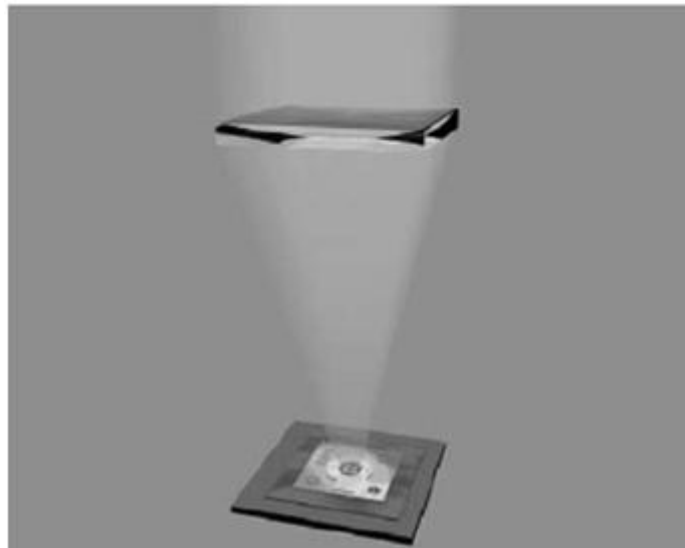


Figura 2.20 Princípio dos Sistemas concentradores fotovoltaicos [3]

Desse modo a área das células fotovoltaicas utilizadas em SCF é reduzida pela razão da concentração e ao mesmo tempo a intensidade luminosa é ampliada com a razão.

O objectivo final é a redução significativa do custo da electricidade produzida. Para tal, diminui-se a área de aplicação das onerosas células fotovoltaicas permutando-as com o menos dispendioso material óptico. Esta abordagem abre caminho para a aplicação de células de maior desempenho, que de outra forma seriam proibitivamente dispendiosas sem a concentração.

A eficiência desta tecnologia está dependente da radiação solar directa que, por sua vez, depende da utilização de sistemas de seguimento solar de maior precisão.

Hoje em dia, a tecnologia referida acima ocupa uma ínfima parte dos sistemas fotovoltaicos instalados por todo o mundo. No entanto, é expectável uma inversão desta realidade com o desenvolvimento da tecnologia e uma redução dos custos.



Figura 2.21 Sistema concentrador fotovoltaico [35]

Uma característica interessante dos SCF é que a distribuição da radiação nas células tem que ser o mais uniforme possível para evitar pontos quentes. A existência de pontos quentes poderá eventualmente causar altas temperaturas que são prejudiciais nos SCF. De modo a evitar estas situações é necessário a aplicação de meios para retirar o calor que poderá diminuir a eficiência de todo o sistema e também diminuir a sua vida útil. Um dos métodos utilizados aproveita o calor produzido e aplica-o em outros processos energéticos [32].

Como vantagens dos SCF podem-se referir:

- A substituição de células fotovoltaicas onerosas por lentes e espelhos com valor comercial menos oneroso;
- Células fotovoltaicas são mais eficientes para maiores níveis de radiação;
- Devido à necessidade de utilização de seguimento solar, a produção de energia é mais prolongada ao longo do dia.

Podem-se considerar como desvantagens dos SCF os seguintes pontos:

- Para elevadas concentrações as células aquecem e perdem eficiência sendo necessário o seu arrefecimento;
- Os sistemas concentradores só utilizam radiação solar directa;
- Os sistemas têm que seguir o sol e concentradores mais eficientes necessitam seguidores com maior precisão.

3. Estudo da Radiação Solar

3.1. Introdução

O fluxo de radiação solar proveniente do Sol e que chega à Terra, é a fonte primária de todas as formas de energia conhecidas. A radiação Solar está na origem dos movimentos de circulação da atmosfera e dos oceanos, da vida vegetal e animal.

A grande dispersão e a variabilidade no tempo da radiação solar são características de importância fundamentais quando se tenta usufruir da energia proveniente do Sol.

Do ponto de vista do projecto e instalação de sistemas de utilização de energia solar, interessa quantificar a quantidade de radiação solar incidente sobre uma superfície na Terra e a sua relação com os parâmetros geográficos e climatológicos.

A complexidade dos fenómenos que influenciam a radiação solar no seu caminho através da atmosfera é o problema primordial que se constata no momento de quantificar a disponibilidade energética. Pode-se conhecer com suficiente precisão a energia proveniente Sol em determinados momentos, mas estimar a quantidade de energia que chegará à superfície da Terra não é de simples compreensão.

Desde o instante em que esta energia penetra a atmosfera terrestre, que dois tipos de factores influenciam o seu trajecto através desta até alcançar a Terra, uns de natureza determinista e outros que se podem denominar aleatórios. Entre os factores deterministas encontram-se os factores astronómicos, que dependem da geometria do sistema Terra-Sol. Estes factores são função da posição relativa de ambos os astros e da posição relativa num ponto Terra. Estes condicionam o percurso da radiação através da atmosfera terrestre e do ângulo de incidência dessa radiação.

Outros factores que influenciam a quantidade de energia incidente na superfície terrestre são de origem climática. São responsáveis pela atenuação da quantidade de energia que poderia alcançar a superfície terrestre e não são de fácil quantificação, contrariamente aos factores astronómicos. Alguns dos componentes existentes na atmosfera e que são responsáveis por esta atenuação são: vapor de água, aerossóis, ozono, nuvens, entre outros.

3.2. O Sol

O Sol é uma esfera constituída por gases extremamente quentes com um raio de $6,96 \times 10^6$ km. A distância média Terra-Sol é denominada de unidade astronómica (*UA*) e tem o valor médio de:

$$d = 1,5 \times 10^{11} m = 1 UA \quad (1)$$

Visto a partir da Terra, o Sol roda sobre o seu eixo todas as quatro semanas. Apesar disso, este astro não roda como um corpo sólido; o equador demora cerca de 27 dias e a região polar perto de 30 dias para cada rotação.

A massa do Sol é de cerca de $1,99 \times 10^{30}$ kg e é constituída principalmente por hidrogénio e Hélio, mais uma quantidade relativamente pequena de outros elementos onde se incluem, oxigénio, carbono, azoto, néon, ferro, silício, magnésio, enxofre e cálcio. O hidrogénio constitui perto de 90% da massa do Sol, deixando para o hélio um valor perto dos 10% da massa.

O Sol tem aproximadamente a temperatura de um corpo negro, sendo que a sua temperatura decresce de uns 5×10^6 K no seu centro para 5780 K à superfície.

A densidade do Sol também decresce rapidamente em consonância com o aumento da distância para o seu centro. No centro verifica-se uma densidade de cerca $150 \text{ g} \times \text{cm}^{-3}$ e na superfície $10^{-7} \text{ g} \times \text{cm}^{-3}$.

A fonte de energia do Sol está associada à fusão termonuclear de átomos de hidrogénio em hélio. No seguimento dessa fusão termonuclear a quantidade de energia libertada causa a redução da massa do Sol, Figura 3.1.

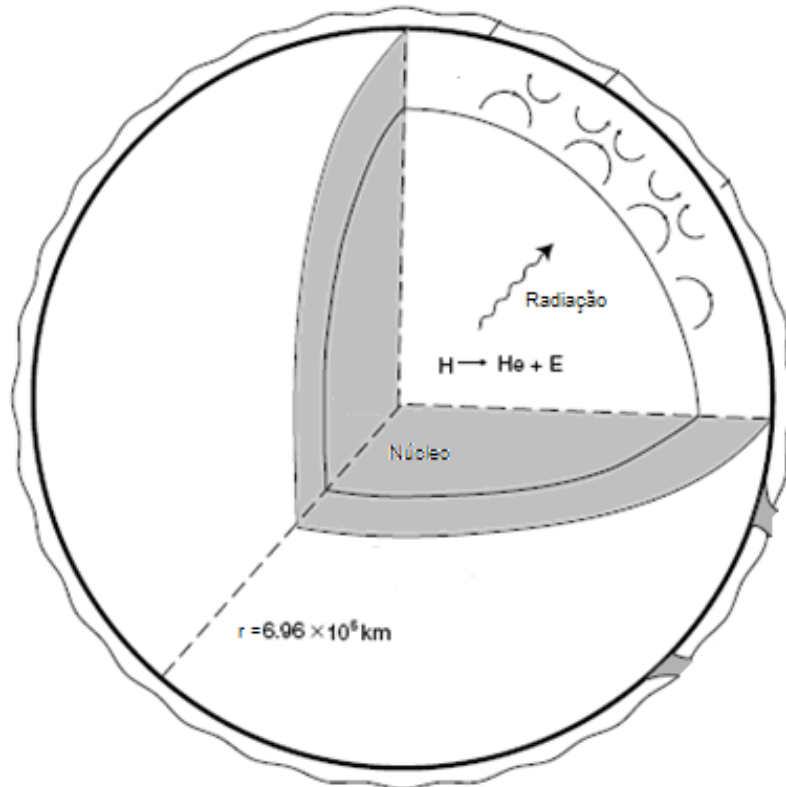


Figura 3.1 Núcleo Solar, adaptado de [34]

3.3. Radiação Solar

3.3.1. Constante Solar

A radiação emitida pelo Sol e a sua relação espacial com a Terra resulta numa aproximadamente fixa intensidade de radiação solar no exterior da atmosfera terrestre, de tal modo que é denominada constante solar. A constante solar, G_{CS} , é a energia proveniente do Sol por unidade de tempo, recebida em uma unidade de área de superfície perpendicular à direção da propagação da radiação, para a média distância Terra-Sol e no exterior da atmosfera terrestre.

O *World Radiation Center* (WRC), adoptou o valor de 1367 W/m^2 e dando continuidade a essa adopção, será este o valor a utilizar neste trabalho para a Constante Solar.

$$G_{CS} = 1367 \text{ W/m}^2 \quad (2)$$

3.3.2. Radiação Extraterrestre

A radiação que incide numa superfície situada acima da atmosfera da Terra é intitulada de radiação extraterrestre, G_{on} , e é composta quase exclusivamente de radiação que viaja ao longo de uma linha recta a partir do Sol. Tal verifica-se pois o espaço intermediário entre a Terra e o Sol é quase desprovida de material que pode espalhar ou reflectir a luz.

Esta radiação extraterrestre apresenta uma variabilidade no seu fluxo na ordem de $\pm 3\%$, devido à variação da distância Terra-Sol.

A expressão utilizada para calcular a radiação extraterrestre, G_{on} , é dada por:

$$G_{on} = G_{CS} \times \left(1 + 0,033 \times \cos \left(\frac{360 \times n}{365} \right) \right) \quad (3)$$

Onde n é o dia do ano e G_{on} é a radiação extraterrestre medida num plano normal à radiação em qualquer dia n do ano.

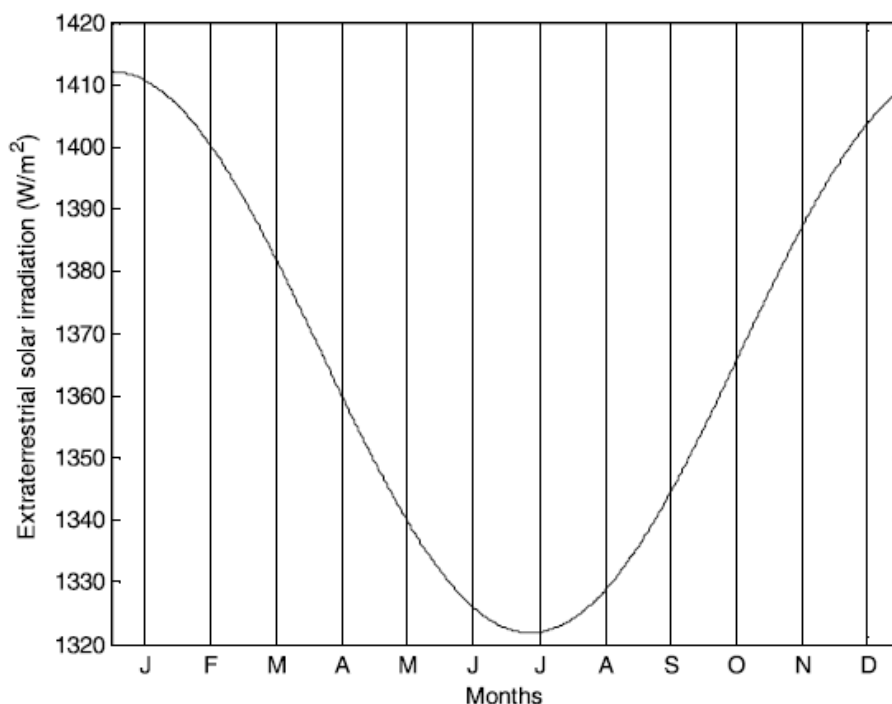


Figura 3.2 Variação da radiação extraterrestre ao longo do ano [46]

3.3.3. Componentes da Radiação Solar

Com a passagem através da atmosfera terrestre e com a interacção com os elementos existentes, a radiação solar é modificada. Alguns elementos como é o caso das nuvens, reflectem a radiação, outros como por exemplo o ozono, oxigénio, dióxido de carbono e vapor de água, têm uma significativa absorção. Por sua vez as gotículas de água e poeira em suspensão também causam dispersão.

O resultado de todas estas interacções é a decomposição da radiação solar incidente na superfície da Terra nos seus constituintes claramente diferenciados, Figura 3.3.

Seguidamente, passa-se a apresentar as definições de cada um dos constituintes da radiação solar:

- Radiação directa, é a radiação proveniente do Sol sem que esta seja dispersa na atmosfera.
- Radiação difusa, é a radiação proveniente do Sol após a sua direcção ter sido alterada devido a dispersões na atmosfera. As propriedades direccionais da radiação difusa dependem da posição, forma e composição dos elementos responsáveis pela dispersão.
- Radiação albedo, é a radiação solar proveniente do Sol após ter sido reflectida no solo terrestre. A quantidade de radiação albedo é fortemente afectada pela natureza do solo.
- Radiação Solar Total, é a radiação solar proveniente do Sol que chega a uma superfície a partir da soma de todas as radiações (directa, difusa e albedo).
- Irradiância, (W/m^2) equivale à potência incidente por unidade de área. O símbolo G é utilizado para a irradiância solar.
- Irradiação, (J/m^2) equivale à energia incidente por unidade de área e obtém-se a partir da integração da irradiância num específico período de tempo. O símbolo H equivale a irradiação diária, enquanto o símbolo I equivale à irradiação horária (ou outro período específico).

Os subscritos de G , H e I podem ser: o quando referente à radiação extraterrestre, b , d , a e g , referentes a radiação directa, difusa, albedo e global. Enquanto i , h e n , referem-se à radiação num plano inclinado, num plano horizontal e num plano normal à direcção de propagação.

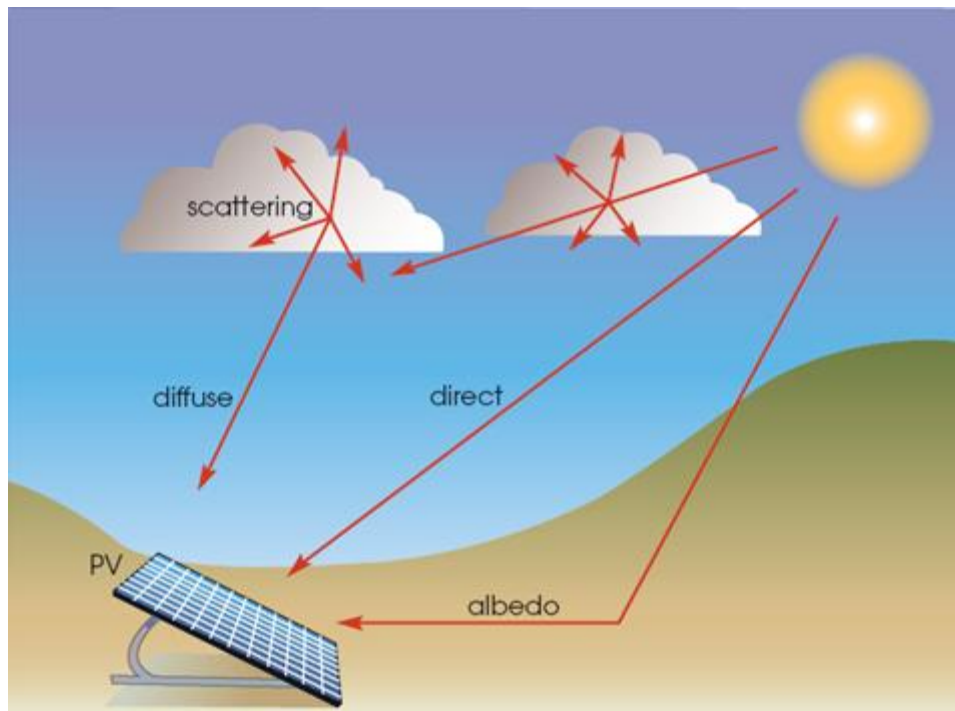


Figura 3.3 Componentes constituintes da radiação solar [35]

3.4. Relações astronómicas Terra-Sol

3.4.1. Excentricidade da Terra

A Terra tem dois movimentos, um de rotação em torno de um eixo que vai de pólo a pólo, denominado eixo polar, cuja média de duração é de 24 horas, e outro, que é a translação que descreve uma órbita elíptica, chamado plano da eclíptica, Figura 3.4. A duração de uma volta completa em torno do Sol é de 365 dias 5 horas 48 minutos e 46 segundos. O tempo que a Terra demora a percorrer essa órbita denomina-se de Ano. De 4 em 4 anos acerta-se o calendário com um dia suplementar (29 Fevereiro em anos bissextos).

O Eixo polar da Terra mantém uma direcção aproximadamente constante e um ângulo de $23,45^\circ$ com o plano da eclíptica. Isso resulta em períodos diferentes que ocorrem ao longo do ano, conhecidos como estações.

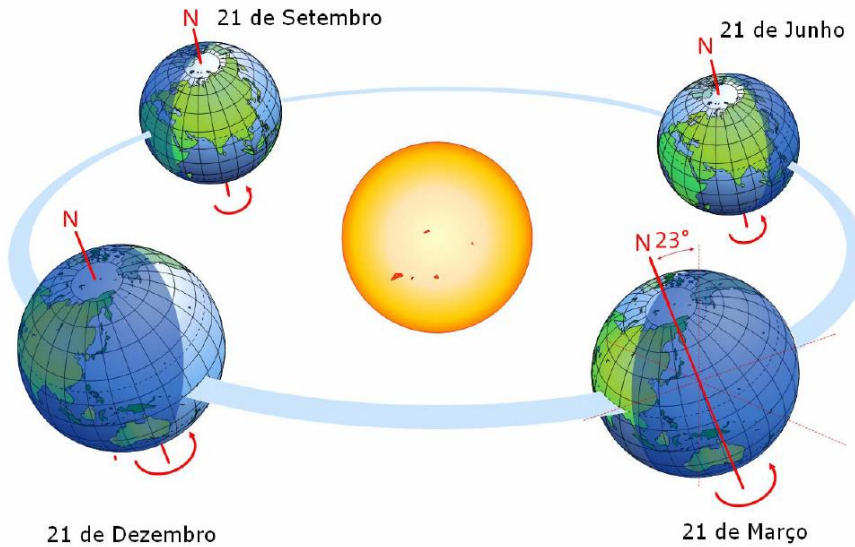


Figura 3.4 Movimento de translação da Terra em torno do Sol [14]

A menor distância entre a Terra e o Sol denomina-se periélio e a maior o afélio. A distância média da Terra ao Sol, r_0 , é uma UA e é igual a $1,496 \times 10^8$ km.

Uma das expressões mais utilizadas para o cálculo da excentricidade, referida em foi desenvolvida por Spencer [21]. O factor de correcção calculado apresenta um erro máximo de 0,0001 e que se exprime em termos duma série de Fourier do seguinte modo:

$$\varepsilon = 1,000110 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,001280 \sin \Gamma + 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma \quad (4)$$

Sendo Γ o ângulo do dia, expresso em radianos, dado por:

$$\Gamma = 2\pi \times \frac{n - 1}{365} \quad (5)$$

Onde n é o número do dia do ano, que toma o valor de 1 para o 1 de Janeiro e 365 para 31 de Dezembro.

3.4.2. Sistema geográfico

O sistema de coordenadas geográficas é um método destinado a referenciar posições sobre a superfície da Terra.

Chama-se latitude, ϕ , de um lugar ao ângulo criado entre o paralelo desse lugar e o plano do equador. A latitude na superfície terrestre mede-se para Norte e para Sul do equador, variado entre 0° e 90° , com sinal positivo a Norte e negativo a Sul. A latitude no equador é igual a 0° .

Chama-se longitude, λ , de um lugar ao ângulo criado entre o meridiano de referência, conhecido por Meridiano de *Greenwich* e o meridiano do lugar. A longitude na superfície terrestre mede-se de Oeste e para Este do meridiano de referência, variado entre 0° e 180° . Com sinal positivo a Este do meridiano de referência e negativo a Oeste.

3.4.3. Tempo Solar

É o tempo baseado no movimento angular aparente do Sol no céu, com o meio-dia solar a corresponder ao momento em que o Sol cruza o meridiano do observador.

O tempo solar verdadeiro (*TSV*) é o tempo utilizado em todas as relações Sol-ângulo e não coincide com o tempo do relógio local (*TLo*). Esta constatação origina na aplicação de duas correcções para a conversão do tempo solar aparente em tempo solar verdadeiro. A primeira correcção é efectuada pela equação do tempo, *EDT*.

3.4.3.1. Equação do tempo

Um dia solar é o intervalo de tempo em que o Sol descreve um ciclo completo em relação a um observador fixo na superfície terrestre.

A equação do tempo deriva da não uniformidade da duração do dia ao longo do ano, ou seja, o tempo necessário para que Terra complete uma revolução em torno do seu próprio eixo relativamente ao Sol não ser constante.

Isto sucede devido a factores associados com a órbita da Terra em torno do Sol. A velocidade orbital terrestre varia ao longo do ano e dessa forma o tempo solar aparente discorda ligeiramente em relação a um tempo médio de um relógio a trabalhar uniformemente.

Para a determinação da equação do tempo a literatura oferece uma diversa quantidade de referências. *Spencer* propôs a expressão seguinte para calcular a equação do tempo [7]:

$$EDT = 229,18 \times (0,000075 + 0,001868\cos\Gamma - 0,032077\sin\Gamma - 0,014615\cos2\Gamma - 0,04089\sin2\Gamma) \quad (6)$$

Nesta equação, a parte entre de parênteses representa a equação do tempo em radianos, e o factor 229,18 utiliza-se para converter os radianos em minutos. O erro máximo é da ordem de 0,0025 radianos, o que corresponde a aproximadamente 35 segundos.

Para cálculos em que a precisão não necessite de ser tão rígida pode-se obter os valores da *EDT* a partir do valor lido do gráfico presente na Figura 3.5.

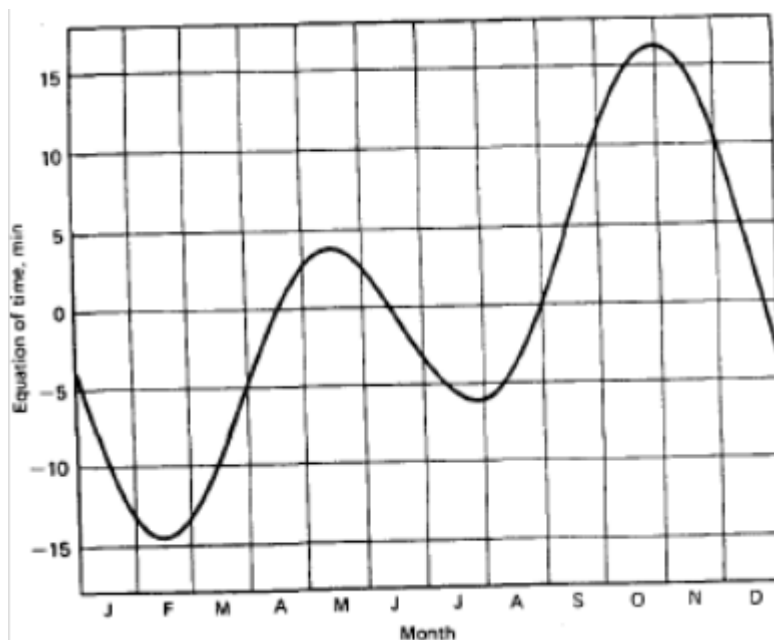


Figura 3.5 Equação do tempo em minutos ao longo de um ano [7]

3.4.3.2. Correção da Longitude

Em segundo lugar é necessário efectuar uma correção de longitude entre a longitude do meridiano de referência e a longitude real do local ou observador. Tal como referido, o meridiano central do fuso horário é o meridiano 0°, o de *Greenwich*.

Como o Sol se move a uma velocidade angular constante de 15° por hora, ou seja, 4' para avançar 1° na longitude, temos:

$$\text{Correção Longitude} = 4 \times (L_{st} - L_{loc}) \quad (7)$$

Onde L_{st} é a longitude do meridiano de referência para o fuso horário local e L_{loc} é a longitude real do local em questão.

A correção da longitude deve ser adicionada ou subtraída à hora local, aplicando-se a regra de adição da correção para longitudes a Este do meridiano de referência e subtracção da correção para longitudes a Oeste.

A expressão geral para o cálculo do tempo solar verdadeiro fica:

$$TSV = TLo + EDT \pm 4 \times (L_{st} - L_{loc}) \quad (8)$$

3.4.3.3. Declinação Solar

Como se sabe, o plano de rotação da Terra em torno do Sol é denominado plano da eclíptica e a Terra gira sobre si mesma em torno do seu eixo denominado eixo polar. Por sua vez este eixo encontra-se aproximadamente inclinado em 23,45° em relação à normal do plano da eclíptica, Figura 3.6.

A declinação solar (δ) é o ângulo formado a partir do plano equatorial da Terra e a linha que une os centros do Sol e da Terra. A declinação assume valores de zero nos equinócios (noite iguais) de primavera e de Outono, e tem um valor aproximado de +23,5° no solstício de verão e cerca de -23,5° no solstício de inverno, para o hemisfério Norte.

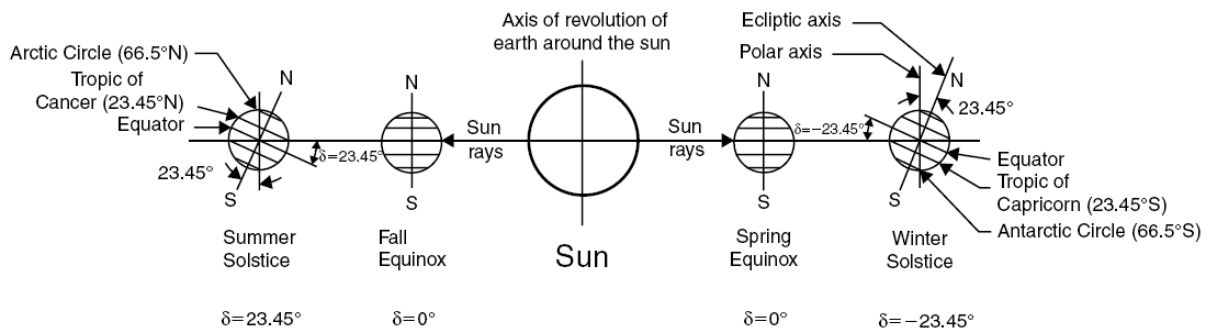


Figura 3.6 Variação anual da declinação solar [32]

De acordo com Spencer a declinação solar pode ser calculada por, [7]:

$$\begin{aligned} \delta = & 0,006918 - 0,399912 \cos \Gamma \\ & + 0,070257 \sin \Gamma - 0,006758 \cos 2\Gamma + 0,000907 \sin 2\Gamma \\ & - 0,002697 \cos 3\Gamma + 0,00148 \sin 3\Gamma \end{aligned} \quad (9)$$

3.4.3.4. Ângulo solar horário

A Figura 3.7 exemplifica o ângulo horário (ω_s). Trata-se do ângulo através do qual a Terra tem que girar para colocar o plano do meridiano de qualquer localização exactamente debaixo do Sol. Este ângulo diminui continuamente desde o nascer do Sol até ao meio dia, onde é zero, e depois começa a aumentar. No pôr-do-sol o ângulo horário do Sol é máximo positivo e no nascer do Sol é máximo negativo. Tudo efectuado a uma velocidade de 15° de longitude por hora. Por outras palavras, o ângulo horário é a medida do deslocamento angular do Sol através da qual a Terra tem que girar para trazer o meridiano do lugar directamente debaixo do Sol. A expressão geral para o cálculo de ω_s é:

$$\omega_s = 15 \times (TLo - 12) \quad (10)$$

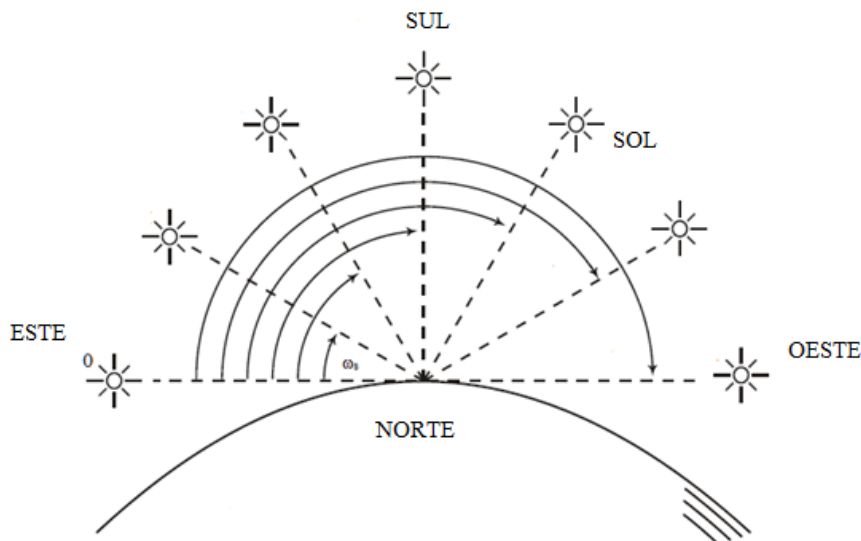


Figura 3.7 Ângulo solar horário ao longo de um dia

3.4.3.5. Ângulo do Zénite Solar

Na Figura 3.8 é possível observar o zénite solar (θ_s) é o ângulo formado entre a normal (vertical) da localização e os raios solares. O complemento do ângulo do zénite solar é o ângulo da altitude solar.

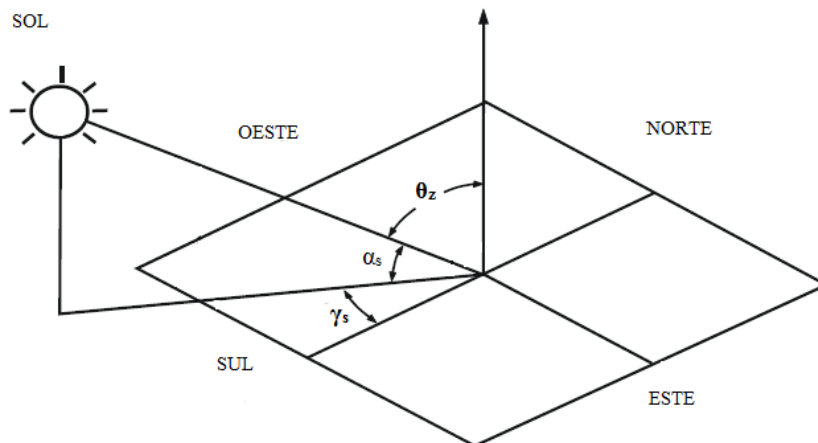


Figura 3.8 Ângulos de Zénite Solar (θ_s), Altitude Solar (α_s) e Azimute Solar (γ_s)

A expressão geral para o cálculo do ângulo do θ_s é dada por:

$$\theta_s = \text{acos}(\text{sen}\phi \times \text{sen}\delta + \text{cos}\phi \times \text{cos}\delta \times \text{cos}\omega_s) \quad (11)$$

Sendo ϕ a latitude, ou seja, a localização angular a Norte ou a Sul do equador.

3.4.3.6. Altitude Solar

A Figura 3.8 exemplifica a altitude solar (α_s), o ângulo formado entre os raios solares e o plano horizontal. A altitude solar varia ao longo do dia com o movimento do Sol e varia ao longo do ano. Quando o Sol nasce ou se põe, a altitude solar é zero e quando está directamente sobre a cabeça de um dado observador em qualquer localização, o ângulo da altitude solar está perto dos 90°.

O ângulo da altitude solar, pode ser calculado de acordo com a expressão:

$$\alpha_s = \text{asen}(\text{sen}\phi \times \text{sen}\delta + \text{cos}\phi \times \text{cos}\delta \times \text{cos}\omega_s) \quad (12)$$

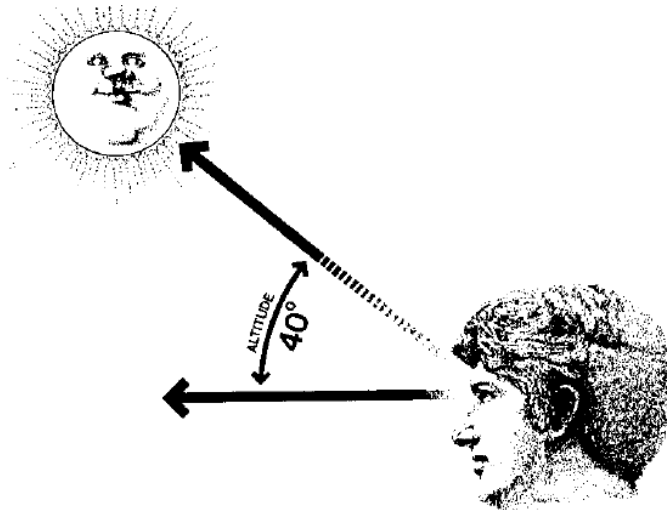


Figura 3.9 Altitude Solar [36]

3.4.3.7. Azimute Solar

Como se pode verificar pela observação da Figura 3.10, o ângulo do azimute solar (γ_s), é o ângulo formado entre os raios solares provenientes do Sol e o meridiano da localização. No hemisfério Norte, o azimute solar é referente ao Sul e é definido como positivo para Oeste, isto é, do meio-dia para a noite, e negativo para Este, isto é, da manhã até ao meio-dia. Ao meio-dia solar, por definição, o Sol está exactamente no meridiano que contém a linha Norte-Sul e consequentemente o azimute solar é 0°.

O ângulo do azimute solar, pode ser calculado de acordo com a expressão:

$$\gamma_s = \text{cos}^{-1}\left(\frac{\text{sin } \alpha_s \times \text{sin } \phi - \text{sin } \delta}{\text{cos } \alpha_s \times \text{cos } \phi}\right) \quad (13)$$

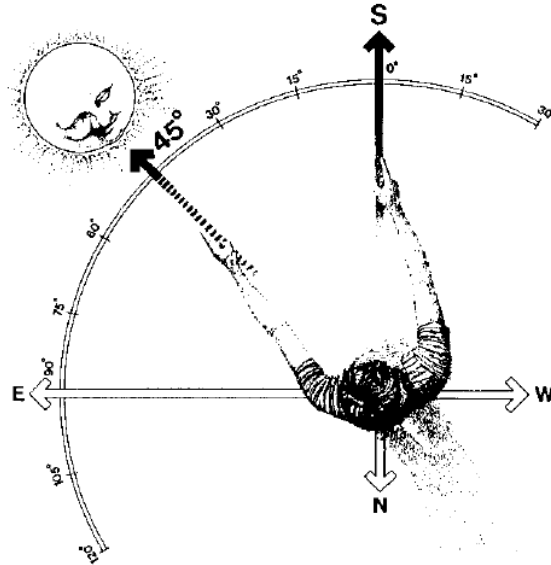


Figura 3.10 Ângulo do azimute solar [36]

3.4.3.8. Nascer do Sol e Pôr-do-Sol

Astrónomos definem o nascer e pôr-do-sol como o momento em que o centro do disco solar está no seguimento do horizonte da Terra, o que equivale a dizer que o Sol nasce e põe-se quando a altitude solar é zero. Deste modo, e aplicando a expressão (12) referente à altitude solar pode-se obter o instante do nascer do Sol ($\omega_{s,nascer}$) e do pôr-do-sol ($\omega_{s,pôr}$) através de:

$$\sin \alpha_s = \sin 0 = \sin^{-1}(\sin \phi \times \sin \delta + \cos \phi \times \cos \delta \times \cos \omega_s) \quad (14)$$

Reduzindo, obtém-se:

$$\omega_{s,nascer} = -\cos^{-1}(-\tan \phi \times \tan \delta) \quad (15)$$

e

$$\omega_{s,pôr} = \cos^{-1}(-\tan \phi \times \tan \delta) \quad (16)$$

No entanto, o instante de nascimento e pôr-do-sol não ocorre quando a altitude solar é zero, mas sim quando o Sol está abaixo do horizonte. A razão advém da dimensão do disco solar e do efeito de refração da luz na atmosfera terrestre.

De forma a obter um valor mais realista para o cálculo do nascer e pôr-do-sol, a utilização da expressão (14) necessita uma correção de $\alpha_s = -0,8333$, resultando em:

$$\sin \alpha_s = \sin(-0,8333) = \sin^{-1}(\sin \phi \times \sin \delta + \cos \phi \times \cos \delta \times \cos \omega_s) \quad (17)$$

Calculados os ângulos horários do nascer e pôr-do-sol, os tempos solares do nascer do Sol (t_{sn}) e do pôr-do-sol (t_{sp}) podem ser obtidos, utilizando as expressões, 18 e 19, do seguinte modo:

$$t_{sn} = 12 - \frac{\omega_{s,nascer}}{15} + EDT \quad (18)$$

$$t_{sp} = 12 + \frac{\omega_{s,pôr}}{15} + EDT \quad (19)$$

A duração do dia (t_d), ou seja, o período em que o centro do Sol está acima do horizonte é:

$$t_d = t_{sp} - t_{sn} \quad (20)$$

Para o cálculo do número de horas de brilho do Sol obtém-se:

$$S_o = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (21)$$

3.5. Radiação Solar disponível

Em Portugal, o Instituto de Meteorologia (IM) é a entidade responsável pela medição da radiação solar. A rede existente em Portugal Continental é constituída por cerca de cem estações, onde vinte e cinco são consideradas principais. A totalidade das estações existentes mede a componente global da radiação solar com periodicidade horária.

O conhecimento da radiação solar existente num determinado através de medição ou estimativa, é condição primordial para um bom projecto e cálculo de desempenho de qualquer sistema solar.

Mesmo após o projecto estar completamente implantado no terreno, é também fundamental uma contínua monitorização da radiação incidente no local, para uma melhor eficiência do sistema e para um controlo da instalação.

3.5.1. Medição da Radiação Solar

A tecnologia do fotovoltaico está relacionada com a aplicação de sistemas fotovoltaicos para a conversão da luz solar em electricidade. O custo das células ainda é muito elevado obrigando à procura contínua por novos materiais e melhores eficiências. A monitorização da radiação solar tem um papel importante na análise da eficiência das células e na avaliação da localização óptima para os sistemas fotovoltaicos.

No caso das estações meteorológicas estarem muito afastadas da instalação, a medição da radiação disponível *insitu* fornece um conhecimento desejável relativamente ao microclima do local. Para além disso, com a monitorização da radiação poder-se-á calcular o rendimento da instalação. Para a medição da radiação solar existem 3 tipos de sensores no mercado e a sua escolha depende da finalidade pretendida em relação ao tipo de radiação a medir.

Os piranómetros, Figura 3.11, são equipamentos utilizados para a medição da radiação solar global, directa e difusa, que recebe em todas as direcções. Esta característica obriga a que a sua instalação seja efectuada numa superfície horizontal para que se verifique o seu correcto funcionamento. Alguns fabricantes deste tipo de equipamentos desenvolveram uma aplicação para que a radiação directa seja eliminada. O sistema mais vulgarmente utilizado é uma banda de sombreamento na superfície do piranómetro inibindo a radiação directa e assim só adquirindo dados de radiação difusa.



Figura 3.11 Exemplo de piranómetro e pireliómetro [29]

Outro dos sensores é o pireliómetro, Figura 3.11, que é utilizado para a medição da radiação solar directa. Este equipamento caracteriza-se pela existência de uma abertura cónica de forma a se visualizar apenas o disco solar e a região vizinha. O sensor é também dotado de um dispositivo automático para o seguimento do Sol.

Actualmente existe no mercado sistemas de seguimento que incorporam os dois equipamentos de medição da radiação solar, Figura 3.12. Estes sistemas incorporam a base de sustentação horizontal para a aplicação de piranómetros e o seguimento solar para pireliómetros.



Figura 3.12 Sun tracker para medição da radiação solar [29]

3.5.2. Estimativa da irradiação solar

Em localizações em que não seja possível efectuar-se uma medição da radiação solar disponível e por consequente não existem dados médios mensais da irradiação global horizontal, $\overline{H}_{h,g}$, recorre-se à estimativa da irradiação solar a partir de dados médios mensais horários de brilho do Sol, \overline{S} , medidos no local. De acordo com a equação de *Ångströmm – Prescott* temos:

$$\frac{\overline{H}_{h,g}}{\overline{H}_o} = a + b \frac{\overline{S}}{\overline{S}_o} \quad (22)$$

Onde, \overline{H}_o é a radiação solar média mensal extraterrestre para a localização em questão e é calculada pela expressão (28), enquanto \overline{S}_o representa o valor médio do máximo número de horas de brilho do Sol e é calculado de acordo com a expressão (21).

Os coeficientes a e b definidos por *Ångströmm*, são constantes calculadas por regressão linear e variam consoante a região em estudo.

Para se estimar a irradiação solar difusa incidente numa superfície horizontal pode-se recorrer a uma correlação com os valores conhecidos de irradiação global média. Com a utilização do índice de claridade, \bar{K}_T , que é a razão entre a irradiação diária mensal média em uma superfície horizontal e a irradiação extraterrestre diária mensal média, dada por:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}_{h,g}}{\bar{H}_o} \quad (23)$$

De acordo com [42], Collares Pereira e Rabl obtiveram a seguinte correlação:

$$\frac{\bar{H}_{h,d}}{\bar{H}_{h,g}} = a_1 - a_2 \cos(2\bar{K}_T - 1,8) \quad (24)$$

Em que os parâmetros a_1 e a_2 variam consoante a localização e a época do ano, pois dependem do ângulo do ω_s e podem ser dadas por:

$$a_1 = 0,775 + 0,374 \left(\omega_s - \frac{\pi}{2} \right) \quad (25)$$

$$a_2 = 0,505 + 0,261 \left(\omega_s - \frac{\pi}{2} \right) \quad (26)$$

Os programas informáticos SolTerm, METEONORM, PVSYST, RETScreen permitem estimar valores de radiação solar horizontal nas suas componentes de radiação global, radiação directa e radiação difusa.

3.6. Estudo da Radiação Solar

Do ponto de vista da utilização da energia solar, o princípio mais básico e importante é a avaliação exacta da radiação solar incidente numa superfície com qualquer ângulo de inclinação e direcção.

No entanto, o ângulo incidente do raio solar em qualquer superfície inclinada altera-se em cada hora e a intensidade da radiação solar numa superfície inclinada também se altera, dependendo das condições atmosféricas e da localização geográfica.

Por estas razões não é simples a obtenção da radiação solar exacta em um colector solar horizontal ou inclinado.

3.6.1. Radiação extraterrestre em superfícies horizontais

Em qualquer altura a radiação solar incidente num plano horizontal fora da atmosfera terrestre é a dada por:

$$G_o = Gcs \times \left(1 + 0,033 \times \cos \left(\frac{360 \times n}{365} \right) \right) \times (\cos \phi \times \cos \delta \times \cos \omega + \sin \phi \times \sin \delta) \quad (27)$$

Geralmente, é necessário o cálculo da radiação extraterrestre diária (H_o), e horária (I_o), numa superfície horizontal. Para tal integra-se a expressão (27) para o período entre nascer e o pôr-do-sol no caso da radiação extraterrestre diária, e no caso da radiação extraterrestre horária o período correspondente aos ângulos das horas ω_1 e ω_2 (sendo ω_2 o maior).

A expressão de H_o será dada por:

$$H_o = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{cs} \times \left(1 + 0,033 \times \cos \left(\frac{360 \times n}{365} \right) \right) \times \left(\cos \phi \times \cos \delta \times \cos \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \times \sin \delta \right) \quad (28)$$

A expressão de I_o será dada por:

$$I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{cs} \times \left(1 + 0,033 \times \cos \left(\frac{360 \times n}{365} \right) \right) \times \left(\cos \phi \times \cos \delta \times (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \times \sin \delta \right) \quad (29)$$

Os limites ω_1 e ω_2 podem definir um período de tempo diferente de 1 hora.

3.6.2. Radiação global em superfícies inclinadas

Usualmente os colectores solares não são instalados horizontalmente, mas instalados com uma inclinação que vai possibilitar o aumento a quantidade de radiação solar interceptada. Projectistas deste tipo de sistemas necessitam de dados de radiação solar em superfícies inclinadas. No entanto, e como já anteriormente referido, a maior parte dos dados existentes de radiação solar são de superfícies horizontais, medidos ou estimados, e só englobam a radiação global horizontal ($I_{h,g}$) e/ou a radiação difusa horizontal ($I_{h,d}$).

Para uma correcta aplicação dos dados existentes é necessário que os mesmos sejam trabalhados e transformados. Os dados de radiação solar em superfícies horizontais têm que ser necessariamente convertidos em dados de radiação solar em superfícies inclinadas, mas para isso é necessário conhecer-se a radiação directa horizontal ($I_{h,b}$), que pode ser calculada por:

$$I_{h,g} = I_{h,b} + I_{h,d} \quad (30)$$

A quantidade irradição incidente numa parcela de superfície terrestre por um determinado período de tempo e em qualquer localização depende da orientação e inclinação dessa superfície. A fim de projectar instalações para aproveitamento de energia solar, é necessário converter os dados de radiação solar numa superfície horizontal, em dados de radiação sobre uma superfície inclinada, tanto para a componente directa como para a componente difusa.

Analise-se primeiramente a componente directa da radiação solar, que numa superfície horizontal a direcção da radiação directa (I_b) forma um ângulo (θ_s) com a vertical ($I_{h,b}$), que é a normal à superfície horizontal, tal como observado na Figura 3.13.

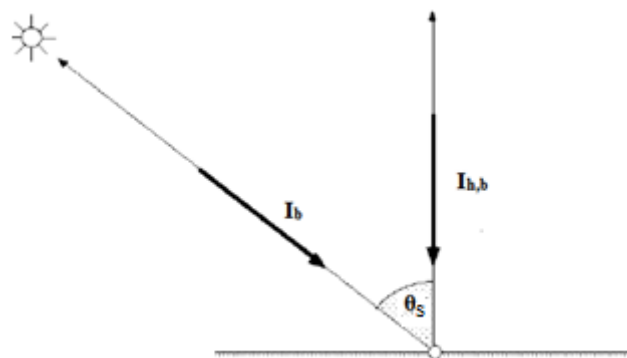


Figura 3.13 Radiação solar Incidente em uma superfície horizontal

A partir da Figura 3.13 obtém-se:

$$I_{h,b} = I_b \times \cos \theta_s \quad (31)$$

A normal de uma superfície inclinada forma um ângulo com a vertical (θ_n), que é também o ângulo que a superfície faz com o plano horizontal (β). A projecção da radiação directa (I_b) forma um ângulo θ com a normal da superfície que é (I_n), tal como observado na Figura 3.14.

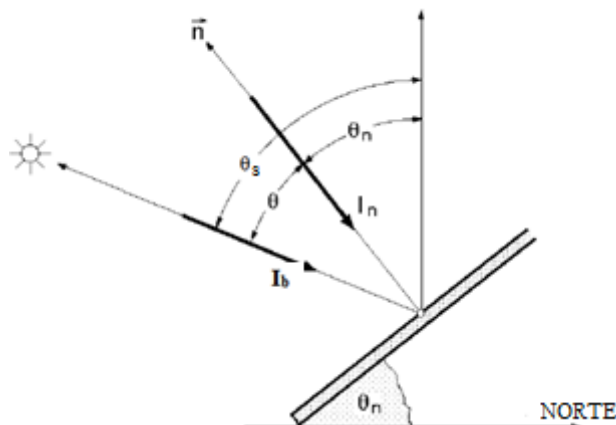


Figura 3.14 Radiação solar Incidente em uma superfície inclinada

O cálculo da radiação directa incidente no plano de uma superfície inclinada é dado por:

$$I_n = I_b \times \cos \theta \quad (32)$$

Para o cálculo da radiação directa é necessário determinar o factor geométrico (R_b), isto é, a radiação directa que atinge uma superfície inclinada é calculada através da correcção da radiação directa projectada na horizontal. Num caso genérico R_b pode ser calculado de acordo com:

$$R_b = \frac{I_n}{I_{h,b}} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_s} \quad (33)$$

Para situações em que o ângulo do azimute do painel é exactamente 0° no hemisfério Norte, a expressão (34) pode ser utilizada para o cálculo do R_b , do seguinte modo:

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \times \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (34)$$

A radiação difusa incidente sobre uma dada superfície inclinada, depende da parte do céu que se vê desde essa superfície, pois tal como foi anteriormente referido, a componente difusa depende das dispersões existentes na atmosfera. Não é só a atmosfera terrestre que influencia o tipo de componente difusa; também as propriedades do solo influenciam. Deste modo, surge uma nova fonte de radiação difusa, o albedo.

A radiação difusa irá ser tratada com algum pormenor no ponto 3.6.4.2. Esta depende do tipo de modelo de radiação solar que se utilize para o cálculo da radiação.

Na generalidade, a radiação total numa superfície inclinada é dada por:

$$I_{i,g} = I_{i,b} + I_{i,d} \quad (35)$$

Sendo $I_{i,g}$ a radiação global numa superfície inclinada, $I_{i,b}$ a radiação directa e $I_{i,d}$ a radiação difusa com o albedo incluído, numa superfície inclinada.

3.6.3. Superfícies inclinadas

Também é necessário conhecer para o ângulo de incidência se efectuar uma estimativa da radiação solar incidente sobre uma superfície com seguimento, a partir de dados conhecidos sobre uma superfície horizontal.

O ângulo solar incidente (θ) é o ângulo formado entre os raios solares e a normal da superfície Figura 3.15. Para uma superfície horizontal θ e θ_s , são iguais.

Para se poder realizar a avaliação solar em qualquer superfície (seja ela estacionária, com qualquer inclinação e orientação, ou com seguimento solar) é necessário conhecer os ângulos de inclinação (β) e orientação (γ) da superfície, bem como o θ formado entre os raios do Sol e a normal da superfície, tal como verificado na Figura 3.15. No caso das superfícies estáticas inclinadas, a β e γ , são constantes mas alteráveis consoante os valores escolhidos.

Por definição, o ângulo de incidência solar sobre uma superfície inclinada com um ângulo β em relação à horizontal e com orientação γ relativamente a Sul, pode ser obtido da expressão (36):

$$\theta = \cos^{-1}(\sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega \sin \beta) \quad (36)$$



Figura 3.15 Posição do Sol relativamente a uma superfície inclinada, adaptado de [1]

3.6.3.1. Superfícies com seguimento solar

O uso de seguimento solar, ou seja, mover a superfície receptora para maximizar a energia solar recebida ao longo de um período de tempo, deve-se à intenção de reduzir o custo da energia produzida. Basicamente existem cinco tipos de seguimento: a dois eixos, polar, azimutal, Norte-Sul horizontal e Este-Oeste horizontal.

Para realizar a avaliação solar numa superfície com seguimento é necessário conhecer os ângulos de inclinação, β , e orientação, γ , da superfície do seguimento solar a aplicar, bem como o θ formado entre os raios do Sol e a normal da superfície.

Seguimento a dois eixos:

O seguimento a dois eixos permite liberdade total de movimentos, pelo que a superfície colectora mantém-se perpendicular aos raios solares, o que assegura uma captação máxima de radiação solar.

Em qualquer instante, o ângulo de incidência é mínimo, ou seja 0° , pois a inclinação da superfície é sempre igual ao ângulo do zénite solar, expressão (38), e a orientação da superfície é igual ao azimute solar, expressão (39).

$$\cos \theta = 1 \quad (37)$$

$$\beta = \theta_s \quad (38)$$

$$\gamma = \gamma_s \quad (39)$$

Seguimento Polar:

Para uma superfície que gire em torno de um eixo Norte-Sul paralelo ao eixo terrestre e com ajuste contínuo, o θ é dado por:

$$\cos \theta = \cos \delta \quad (40)$$

A inclinação da superfície (β) em relação à horizontal varia continuamente e é dada por:

$$\tan \beta = \frac{\tan \phi}{\cos \gamma} \quad (41)$$

Onde o ângulo azimutal da superfície, é dado por:

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{\sin \theta_s \sin \gamma_s}{\cos \theta' \sin \phi} + 180 \times C_1 C_2 \quad (42)$$

Onde,

$$\cos \theta' = \cos \theta_s \cos \phi + \sin \theta_s \sin \phi \quad (43)$$

$$C_1 = \begin{cases} 0 & \text{se } \left(\tan^{-1} \frac{\sin \theta_s \sin \gamma_s}{\cos \theta' \sin \phi} \right) + \gamma_s = 0 \\ 1 & \text{em outra situação} \end{cases} \quad (44)$$

$$C_2 = \begin{cases} 1 & \text{se } \gamma_s \geq 0 \\ -1 & \text{se } \gamma_s < 0 \end{cases} \quad (45)$$

Seguimento em um eixo Norte-Sul horizontal

Para uma superfície plana a rodar em torno de um eixo horizontal Norte-Sul, o ângulo de incidência é dado por:

$$\cos \theta = \sqrt{\cos^2 \theta_s + \cos^2 \delta \sin^2 \omega} \quad (46)$$

E a inclinação da superfície em relação à horizontal é dada por:

$$\tan \beta = \tan \theta_s |\cos(\gamma - \gamma_s)| \quad (47)$$

O azimute da superfície, depende do sinal do ângulo do azimute solar, pelo que:

$$\gamma = \begin{cases} 90 & \text{se } \gamma_s \geq 0 \\ -90 & \text{se } \gamma_s < 0 \end{cases} \quad (48)$$

Seguimento solar em um eixo Este-Oeste horizontal:

Para este seguimento o ângulo de incidência é dado por:

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \delta \sin^2 \omega} \quad (49)$$

Sendo a inclinação dada pela expressão:

$$\tan \beta = \tan \theta_s |\cos \gamma_s| \quad (50)$$

Por sua vez, o azimute da superfície é dado por:

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{se } \gamma_s < 90 \\ 180 & \text{se } \gamma_s > 90 \end{cases} \quad (51)$$

Seguimento solar Azimutal:

O seguimento solar azimutal consiste numa superfície com uma inclinação fixa e a rodar em torno de um eixo vertical. O ângulo de incidência é dado por:

$$\cos \theta = \cos \theta_s \cos \beta + \sin \theta_s \sin \beta \quad (52)$$

Sendo a inclinação fixa:

$$\beta = \text{constante} \quad (53)$$

E o azimute da superfície dado por:

$$\gamma = \gamma_s \quad (54)$$

3.6.4. Modelos de Radiação Solar

A irradiância solar global em uma superfície inclinada pode ser dividida em duas componentes, a componente directa e a componente difusa. A soma destas componentes resulta na irradiância global numa superfície inclinada, tal como indicado anteriormente.

Estudos de céu claro levaram a uma descrição da componente difusa como sendo composta por uma parcela de difusa isotrópica ($I_{i,d,iso}$), em que a irradiância é uniforme em toda a cúpula celeste, por uma parcela difusa de circumsolar ($I_{i,d,cs}$), resultante da dispersão atmosférica e concentrada na zona do céu em redor do Sol, uma parcela difusa de horizonte iluminado ($I_{i,d,bh}$), especialmente pronunciado em céus limpos e a parcela de radiação reflectida do solo para a superfície inclinada ($I_{i,d,a}$), albedo.

Uma expressão mais completa do que a expressa na expressão (35) e que inclui todas as parcelas da componente difusa é dada por:

$$I_{i,g} = I_{i,b} + I_{i,d,iso} + I_{i,d,cs} + I_{i,d,bh} + I_{i,d,a} \quad (55)$$

3.6.4.1. Modelo isotrópico

O modelo para céu isotrópico (Hottel and Woertz, 1942 citado por Duffie and Beckman, 1991; Liu and Jordan, 1960) é o modelo mais simples e assume que toda a radiação difusa é uniformemente distribuída em toda a cúpula celeste e que a radiação reflectida do solo é difusa. Para superfícies inclinadas em relação à horizontal por um ângulo β , a irradiância é expressa por:

$$I_{i,g} = I_{h,b}R_b + I_{h,d} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_{h,g} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (56)$$

As parcelas de difusa circumsolar e de horizonte iluminado são consideradas nulas, pois assume-se que toda difusa é isotrópica.

3.6.4.2. Modelos anisotrópicos

O modelo isotrópico é de simples compreensão, tal como o cálculo da radiação numa superfície inclinada é simples. No entanto, modelos mais evoluídos foram desenvolvidos e estes já consideram as parcelas difusas circumsolar e/ou horizonte iluminado numa superfície inclinada, tal como demonstrado na Figura 3.16.

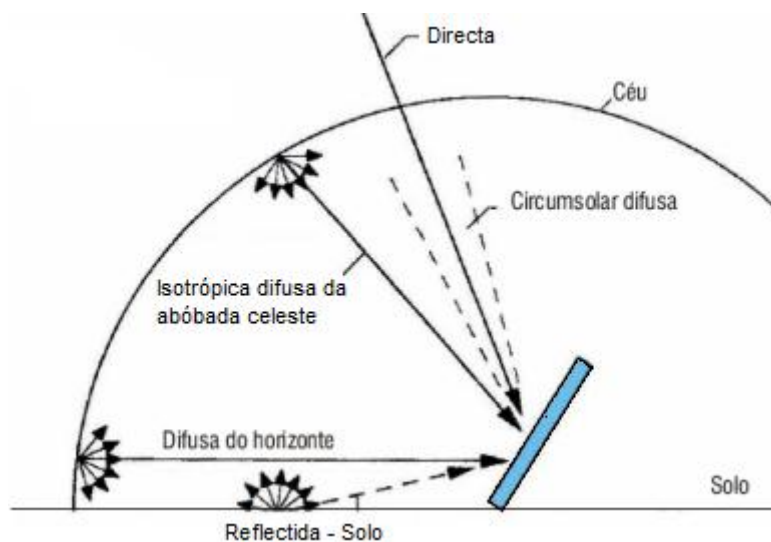


Figura 3.16 Esquema de incidência de radiação em uma superfície, adaptado [7]

3.6.4.3. Modelo de Klucher

De acordo com Klucher (1979) o modelo isotrópico dá bons resultados para céus nublados mas menospreza a irradiância em céus limpos ou parcialmente nublados, quando existe um aumento da intensidade perto do horizonte e na zona circumsolar do céu. O modelo desenvolvido por Klucher é dado por:

$$I_{i,g} = I_{h,b}R_b + I_{h,d} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + F' \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] (1 + F' \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z) + I_{h,g} \times \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (57)$$

Em que F' é o índice de claridade, dado por:

$$F' = 1 - \left(\frac{I_{h,d}}{I_h}\right)^2 \quad (58)$$

O primeiro dos factores modificadores da radiação difusa tem em consideração a parcela de horizonte iluminado e o segundo factor é referente à parcela circumsolar. Em condições de céu nublado o índice F' é zero e o modelo reduz-se ao modelo isotrópico.

3.6.4.4. Modelo de Hay-Davies

No modelo de Hay e Davies (1980) a componente difusa é composta pela parcela isotrópica e circumsolar. Para Hay e Davies, a parcela difusa do horizonte iluminado não é tida em consideração.

O índice anisotrópico (A) representa a propagação da componente directa pela atmosfera e é dada por,

$$A = \frac{I_{h,b}}{I_0} \quad (59)$$

O índice anisotrópico é utilizado para quantificar qual a quantidade de componente difusa é proveniente da parcela circumsolar sendo a restante parcela isotrópica.

A irradiância solar é expressa em:

$$I_{i,g} = (I_{h,b} + I_{h,d}A)R_b + I_{h,d}(1 - A) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + I_{h,g} \times \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (60)$$

A parcela reflectida do solo, o albedo, é tratada como no modelo isotrópico.

3.6.4.5. Modelo de Reindl

Em adição à parcela difusa isotrópica e circumsolar, o modelo Reindl também contabiliza a parcela do horizonte iluminado e emprega o índice anisotrópico A . A irradiância total numa superfície inclinada é então, calculada por:

$$I_{i,g} = (I_{h,b} + I_{h,d}A)R_b + I_{h,d}(1 - A) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) \left[1 + \sqrt{\frac{I_{h,b}}{I_{h,g}}} \sin^3 \left(\frac{\beta}{2}\right)\right] + I_{h,g} \times \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (61)$$

A parcela reflectida do solo, o albedo, é tratada como no modelo isotrópico.

4. Aplicação da Metodologia Desenvolvida e Discussão dos Resultados Obtidos

4.1. Considerações Iniciais

Apesar do expressivo esforço existente em Portugal na área das energias renováveis, o aproveitamento deste potencial energético é ainda pequeno e está aquém da sua real capacidade. Portugal é um dos países da Europa, e do mundo, com maior potencial em energias renováveis. Esse potencial deve-se à sua posição geográfica, que lhe confere uma exposição solar elevada entre as 2200h e as 3000h, consideravelmente superior a muitos países do centro e do Norte da Europa.

De acordo com as estatísticas de Junho de 2011 da DGEG [45], tem se verificado um aumento na utilização de energia fotovoltaica para a produção de energia eléctrica, Figura 4.1.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Junho 2011*
Hídrica Total	15 894	10 053	5 000	11 323	10 351	7 102	8 717	16 249	13 083
Grande Hídrica (>30MW)	14 303	9 065	4 454	9 897	9 406	6 190	7 547	14 306	11 481
PCH (>10 e <=30 MW)	822	487	265	702	504	478	618	1 045	833
PCH (<= 10 MW)	769	501	281	724	441	434	552	898	769
Eólica	468	787	1 741	2 892	4 007	5 720	7 506	9 078	8 603
Biomassa (c/ cogeração)	1 069	1 206	1 286	1 302	1 361	1 381	1 390	1 579	1 645
Biomassa (s/ cogeração)	43	52	64	78	149	146	311	612	665
Resíduos Sólidos Urbanos	523	475	545	532	498	441	458	455	461
Biogás	2.3	13.8	31	33	55	67	80	97	120
Fotovoltaica	2.6	2.9	3.8	4.1	23.6	41.4	159.9	213.3	233.8
Ondas/Marés									
Total	18 002	12 590	8 671	16 164	16 445	14 898	18 622	28 283	24 811
<i>IPH (ano base da Directiva - 1997)</i>	<i>1.115</i>	<i>0.680</i>	<i>0.336</i>	<i>0.800</i>	<i>0.631</i>	<i>0.461</i>	<i>0.634</i>	<i>1.070</i>	<i>0.857</i>
Hídrica Total Corrigida (IPH da Directiva)	14 255	14 784	14 881	14 154	16 404	15 406	13 749	15 186	15 266
Total Corrigido	16 363	17 321	18 552	18 995	22 498	23 202	23 654	27 220	26 994
Produção Bruta + Saldo Imp. (GWh)	48 220	50 017	51 729	52 749	52 952	53 558	53 134	54 270	53 863
% de renováveis (Real)	37.3%	25.2%	16.8%	30.6%	31.1%	27.8%	35.0%	52.1%	46.1%
% de renováveis (Directiva)	33.9%	34.6%	35.9%	36.0%	42.5%	43.3%	44.5%	50.2%	50.1%

Figura 4.1 Evolução histórica da energia eléctrica produzida através de energias renováveis (Gwh) em Portugal Continental, Extraído de DGEG, estatísticas rápidas Junho 2011.

No entanto, o sector da energia solar em Portugal é ainda muito subaproveitado, principalmente quando analisamos o conjunto de todas as energias renováveis que contribuem para a produção de energia eléctrica. Apesar da implementação de políticas de incentivo à microgeração, não se têm verificado progressos expressivos. As estatísticas da DGEG de Junho de 2011 demonstram que energia solar fotovoltaica representa 0,9 por cento da produção da energia eléctrica derivada de fontes renováveis, Figura 4.2.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Junho 2011
Hídrica Total	88.3	79.9	57.7	70.1	62.9	47.7	46.8	57.5	52.7
Hídrica (>10 MW)	84.0	75.9	54.4	65.6	60.3	44.8	43.8	54.3	49.6
Grande Hídrica (>30MW)	79.5	72.0	51.4	61.2	57.2	41.5	40.5	50.6	46.3
PCH (>10 e <=30 MW)	4.6	3.9	3.1	4.3	3.1	3.2	3.3	3.7	3.4
PCH (<= 10 MW)	4.3	4.0	3.2	4.5	2.7	2.9	3.0	3.2	3.1
Eólica	2.6	6.3	20.1	17.9	24.4	38.4	40.3	32.1	34.7
Biomassa + RSU + Biogás	9.1	13.9	22.2	12.0	12.5	13.7	12.0	9.7	11.7
Biomassa (c/ cogeração)	5.9	9.6	14.8	8.1	8.3	9.3	7.5	5.6	6.6
Biomassa (s/ cogeração)	0.2	0.4	0.7	0.5	0.9	1.0	1.7	2.2	2.7
Resíduos Sólidos Urbanos	2.9	3.8	6.3	3.3	3.0	3.0	2.5	1.6	1.9
Biogás	0.0	0.1	0.4	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.5
Fotovoltaica	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.9	0.8	0.9
Total de renováveis	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Figura 4.2 Evolução do peso da produção de cada tecnologia no total de produção de energia renovável em Portugal Continental, Extraído de DGEG, estatísticas rápidas Junho 2011.

Com a procura crescente de informação acerca do aproveitamento da radiação solar como fonte suplementar e alternativa às fontes convencionais de energia, torna-se necessário o conhecimento detalhado das características climáticas da radiação solar incidente sobre superfícies inclinadas em relação à superfície horizontal. Para qualquer estudo a efectuar na área da energia solar, é necessário que se conheça a radiação solar incidente em uma superfície inclinada, bem como a sua variação sazonal.

Desse modo, na tentativa de se efectuar uma avaliação do recurso solar, foi desenvolvida uma metodologia para sistemas estacionários inclinados e para sistemas com seguimento solar, que efectua a avaliação do recurso solar existente em qualquer localização geográfica de Portugal Continental ou hemisfério Norte do globo terrestre.

No decurso do capítulo 3 foram apresentados e explicados os parâmetros que se irão apresentar em seguida e que estão na base de desenvolvimento da metodologia desenvolvida. Por isso só se fará referência aos mesmos devido à sua aplicação na metodologia criada para a avaliação do potencial solar energético.

Nos próximos subcapítulos passaremos à explicação da metodologia desenvolvida neste trabalho para o estudo da avaliação solar.

4.2. Aplicação da Metodologia Desenvolvida

O objectivo desta dissertação é o desenvolvimento de uma metodologia para a avaliação do recurso solar incidente em superfícies inclinadas e em superfícies com seguimento solar. Depois de conhecidas as potencialidades de cada método de aproveitamento da radiação solar, foi efectuada uma comparação da radiação solar que se verifica com a aplicação de superfícies com seguimento solar em detrimento de superfícies inclinadas. Os resultados de radiação solar obtidos nesta dissertação referem-se a valores incidentes de irradiância ou de irradiação solar em qualquer tipo de superfícies.

Na base do desenvolvimento desta metodologia estão três *softwares* informáticos:

- Os dados de radiação solar sobre superfícies horizontais foram obtidos através do Solterm, já que não existem medições/observações de todas as componentes da radiação solar em Portugal, nomeadamente da componente directa;
- O algoritmo desenvolvido foi implementado na linguagem de programação MATLAB;
- O Surfer foi o *software* utilizado nesta dissertação para o mapeamento de Portugal a partir da avaliação solar efectuada.

Para a avaliação do recurso solar existente em qualquer local deve-se numa primeira fase ter o devido conhecimento das coordenadas geográficas dessa localização para se efectuar uma correcta avaliação.

Depois inseridas no modelo as coordenadas geográficas de onde se pretende efectuar a avaliação do recurso solar, deve-se determinar a radiação solar existente nesse mesmo local.

Os dados inseridos são dados de radiação global horizontal, radiação difusa horizontal e correspondem a um ano meteorológico tipo, com um intervalo de amostragem horária de um ano comum (Figura 4.3). Os dados de radiação solar inseridos, são referentes a quarenta localidades de Portugal Continental, escolhidas aleatoriamente a partir da base de dados existente no Solterm. O algoritmo utiliza as coordenadas geográficas para calcular a geometria do sistema Terra-Sol. É efectuada uma correlação entre a localização geográfica dos dados da radiação imputada, e da geometria Terra-Sol. O resultado obtido fornece os dados posicionais entre a Terra e o Sol.

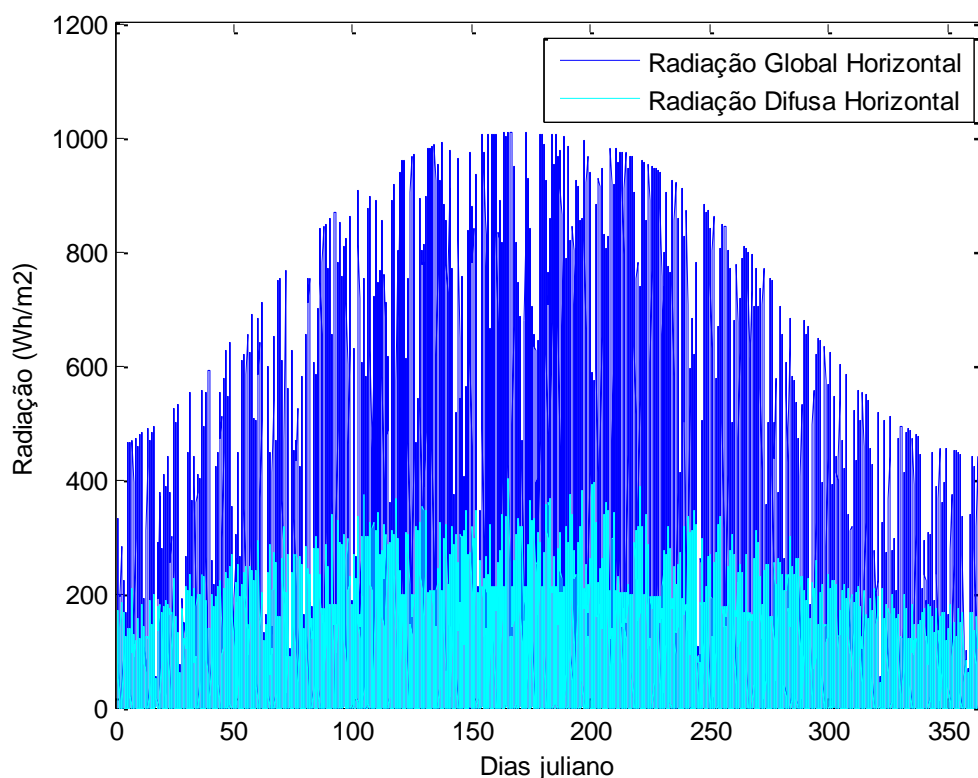


Figura 4.3 Irradiação Global Horizontal e Difusa Horizontal em Lisboa

4.2.1. Geometria Terra-Sol

Tal como referido anteriormente (capítulo 3) a correcção efectuada para o cálculo do *TSV* é utilizada em todas as relações Sol-ângulo uma vez que não coincide com o *TLo*.

Esta correcção é necessária para se confirmar que os dados obtidos do Solterm coincidem com os posicionamentos Terra-Sol calculados pela metodologia. Caso contrário obter-se-iam várias horas do dia em que os dados inseridos indicariam existência de radiação solar mas o posicionamento Terra-Sol calculado pela metodologia, indicaria que o Sol ainda não tinha nascido no horizonte e seria impossível obter-se radiação solar.

Para o cálculo do *TSV*, é criado no algoritmo uma matriz denominada *TLo*, que não é nada mais do que todas as horas existentes em um ano comum, 8760 horas. Esta matriz *TLo* é depois utilizada para a definição do parâmetro dia, equivalente aos dias existentes em um ano comum. Este parâmetro é aplicado no cálculo da *EDT*, Figura 3.5, de acordo com a expressão (6). Para além destas correcções, foi também efectuada a correcção da longitude real do local e a longitude do meridiano de referência, tal como indicado no capítulo 3 e com o uso da expressão (7). Após estas correcções foi determinado o *TSV* de acordo com a expressão (8).

Após este acerto dos tempos solares e do relógio, passou-se ao cálculo da relação Terra-Sol. Os quatro parâmetros a seguir citados, declinação solar, azimute solar, altitude Solar e zénite solar, são de elevada importância na avaliação do recurso solar final, pois fornecem a posição do sol no céu em relação ao ponto geográfico terrestre em que se pretende efectuar a avaliação do potencial energético solar.

O primeiro parâmetro a ser calculado para se definir qual a posição do Sol no céu é a declinação solar (Figura 4.4) a partir da equação (9). Pela análise da equação (9) verifica-se que para o cálculo da declinação solar só é necessário inserir o dia para o qual se pretende calcular este parâmetro. Como a periodicidade dos dados é horária, a metodologia desenvolvida não calcula a declinação solar para cada dia mas sim para cada hora do dia.

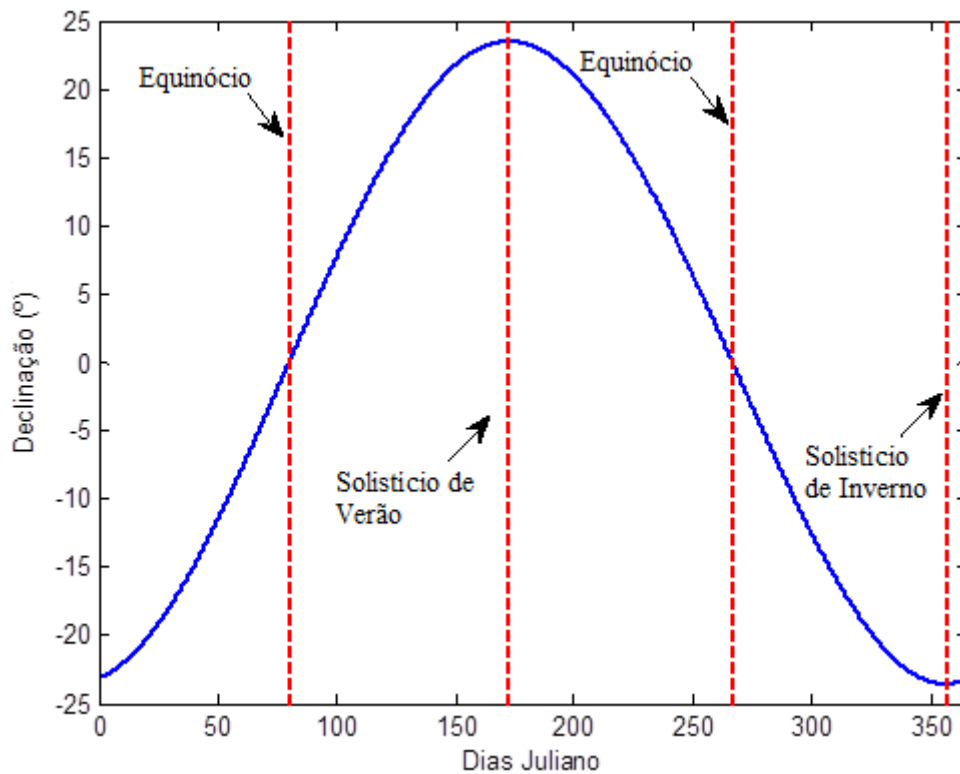


Figura 4.4 Declinação Solar

Passou-se, em seguida, à determinação dos parâmetros do zénite solar e da altitude solar, tal como observado na Figura 4.5. O complemento do ângulo do zénite solar é o ângulo da altitude solar e para o cálculo dos mesmos utilizou-se as expressões (11) e (12) respectivamente.

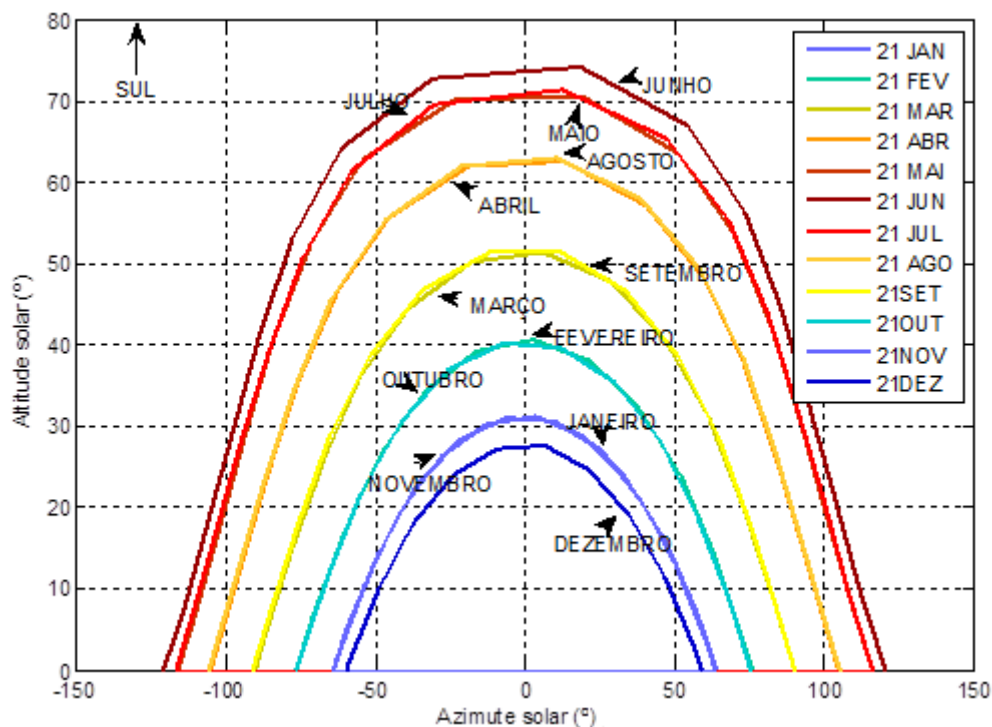


Figura 4.5 Posição do Sol em Lisboa ao longo de um ano

O azimute solar identifica o ângulo formado entre a vertical da posição do Sol e a vertical do meridiano do local. Para o cálculo do ângulo do azimute solar e de acordo com a expressão (13) é necessário o conhecimento do ângulo da declinação solar e da altitude solar.

4.2.2. Cálculo da Radiação Solar em Superfícies Inclinadas e em Superfícies com Seguimento - Modelo Adoptado

4.2.2.1. Ângulos Particulares da Superfície

Para o cálculo da radiação solar incidente numa superfície inclinada ou com seguimento, a radiação solar incidente na superfície horizontal é transformada. Para tal aplicam-se os parâmetros identificados na relação geométrica Terra-Sol, isto é, os parâmetros inseridos pelo utilizador ou calculados pela metodologia, consoante o método a utilizar, para superfícies estacionárias inclinadas ou superfícies com seguimento.

Nos dois próximos subcapítulos será explicado como foram determinados os ângulos referentes à superfície solar em avaliação (estacionária inclinada ou com seguimento): inclinação da superfície, azimute da superfície e incidência solar na superfície.

Superfícies inclinadas estacionárias:

No caso das superfícies inclinadas é fornecido ao algoritmo parte da informação necessária para a avaliação da radiação solar, isto é, são fornecidos pelo utilizador dados da orientação (azimute da superfície) e da inclinação da superfície. No capítulo 3 estes dois parâmetros foram identificados como constantes, pois é o utilizador que ajusta a superfície à avaliação que pretende efectuar.

Depois de definidas as características da superfície, o programa calcula de acordo com a expressão (36) o θ , na superfície inclinada. Este é o ângulo formado entre os raios solares incidentes na superfície e a normal da superfície (Figura 3.14).

Superfícies com seguimento solar:

No modelo desenvolvido, só é necessário a intervenção do utilizador no seguimento azimutal no que diz respeito às superfícies com seguimento. Neste tipo de seguimento a β da superfície, expressão (53), é dada por uma constante definida pelo utilizador. O ângulo de θ e γ , são determinados a partir das expressões 52 e 54, respectivamente.

Nos restantes métodos de seguimento, todos os parâmetros são calculados de acordo com as expressões referentes ao tipo de seguimento, existentes no subcapítulo 3.6.3.1.

4.2.2.2. Razão entre a radiação directa numa superfície horizontal e numa superfície inclinada

Para o cálculo da razão entre a radiação directa na superfície horizontal e na superfície inclinada em avaliação, R_b , é utilizada a expressão (33). Nesta são aplicados os parâmetros anteriormente calculados e/ou inseridos. Para melhor compreensão do cálculo de R_b observe-se as figuras (3.13) e (3.14) que demonstram a transformação da radiação directa na superfície horizontal na radiação directa na superfície inclinada.

De acordo com [21], no cálculo de R_b poderão aparecer dados insatisfatórios que advêm da natureza da expressão utilizada e dos dados de radiação global horizontal serem de periodicidade horária. Contudo a expressão para o cálculo de R_b traduz-se em dados satisfatórios para a maior parte das horas diárias, mas no caso de horas que incluam o nascer e pôr-do-sol os dados não são realistas, pelo que foram desprezados.

4.2.2.3. Modelo Adoptado

Para o cálculo da radiação solar optou-se por utilizar o modelo anisotrópico de Hay e Davies (1980), que considera a irradiação difusa composta por duas subcomponentes: a circumsolar e a isotrópica. Para a avaliação do recurso solar utilizou-se a expressão (60) e aplicaram-se os parâmetros anteriormente identificados.

A expressão (60) utiliza o factor de correcção R_b da radiação directa e para a parte da radiação difusa, a cada parcela é dado um peso próprio, através do índice anisotrópico A , definido pela expressão (59). Este índice define a percentagem da irradiação difusa a ser tratada como circumsolar, com a percentagem restante considerada isotrópica. Em condições de céu limpo, A tende para um, e a radiação difusa circumsolar é mais significativa que a radiação difusa isotrópica. Em condições de céu nublado, A tende para zero e toda a radiação difusa é tratada como isotrópica. Qualquer que seja a situação verificada, a radiação difusa circumsolar definida a partir de A é projectada na superfície inclinada como se trata-se da componente da radiação directa, sendo a restante tratada como isotrópica. O restante membro da expressão (60), é a parcela respeitante à radiação do albedo e esta é tratada como se fosse isotrópica.

4.3. Avaliação do Recurso solar - Comparações efectuadas

Como já referido anteriormente, foram utilizados na elaboração desta dissertação dados de radiação solar horizontal obtidos a partir do *software* informático Solterm. Tratam-se de dados estimados de radiação solar, nomeadamente valores de irradiância solar horizontal com periodicidade horária e referentes a um ano genérico. Para a quantificação da radiação solar, que é possível obter a partir dos dados do Solterm, optou-se pela utilização do modelo anisotrópico de Hay e Davies. A grande particularidade deste modelo, é a existência de um índice anisotrópico A que indica qual a quantidade da radiação difusa incidente numa superfície horizontal que é tratada como radiação directa.

No desenvolvimento dos mapeamentos a seguir apresentados foi utilizado o *software* informático Surfer, que permitiu desenhar linhas de igual amplitude ou quantidade de uma determinada variável em representações de Portugal Continental. As linhas representadas e o código de cores associado são representantes e elucidativos da evolução dessa variável ao longo do território de Portugal Continental.

Como é de conhecimento geral, a radiação solar global incidente numa superfície horizontal em Portugal continental, tem maior predominância no Sul do País, tal como observado na Figura 4.6.

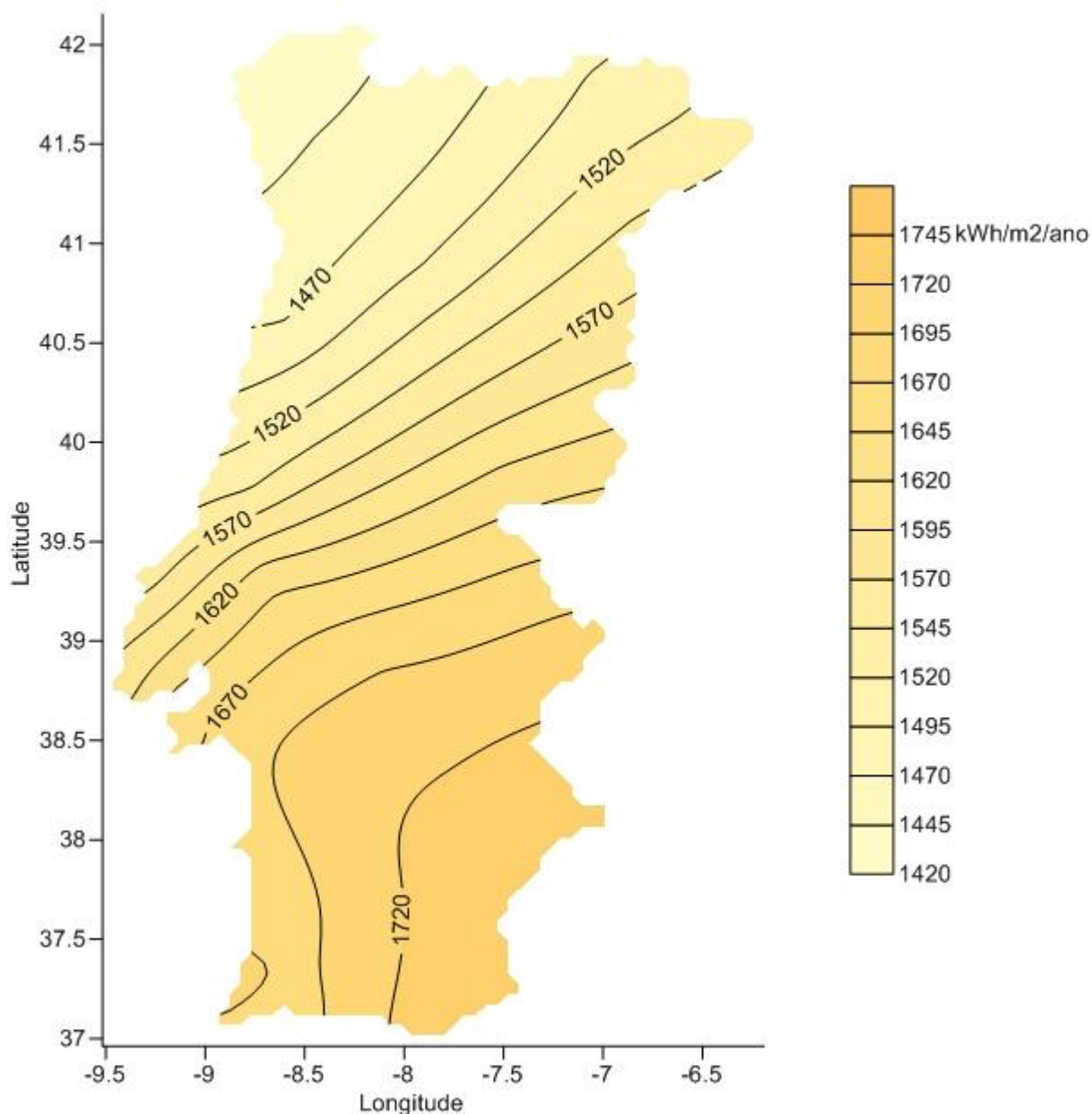


Figura 4.6 Radiação solar global horizontal anual

A partir da observação da Figura 4.6 é facilmente detectável que é no Sul de País que se verificam os maiores valores de radiação solar incidente num plano horizontal, verificando-se também uma diminuição gradual da radiação global do Sul para o Norte. Por outro lado, e em localizações à mesma latitude, verifica-se um aumento da radiação solar do litoral para o interior do País.

Estas diferenças resultam num padrão visual bastante perceptível, de radiações globais semelhantes para latitudes mais altas no interior em relação a latitudes mais baixas no litoral.

As constatações acima referidas estão de certa forma em consonância com o espectável de radiação solar em superfícies horizontais, existindo maior quantidade de radiação solar no Sul relativamente ao Norte e no interior em relação ao litoral.

Pela análise do código de cores criado na Figura 4.7, relativo ao rácio de radiação directa horizontal existente na radiação global horizontal, verifica-se uma diminuição gradual da quantidade de radiação directa do Sul até ao centro do País e um aumento da radiação directa do litoral para o interior. É também identificável que, para latitudes superiores à zona centro, o rácio de radiação aumenta, superando os valores verificados tanto no Sul como no centro do País.

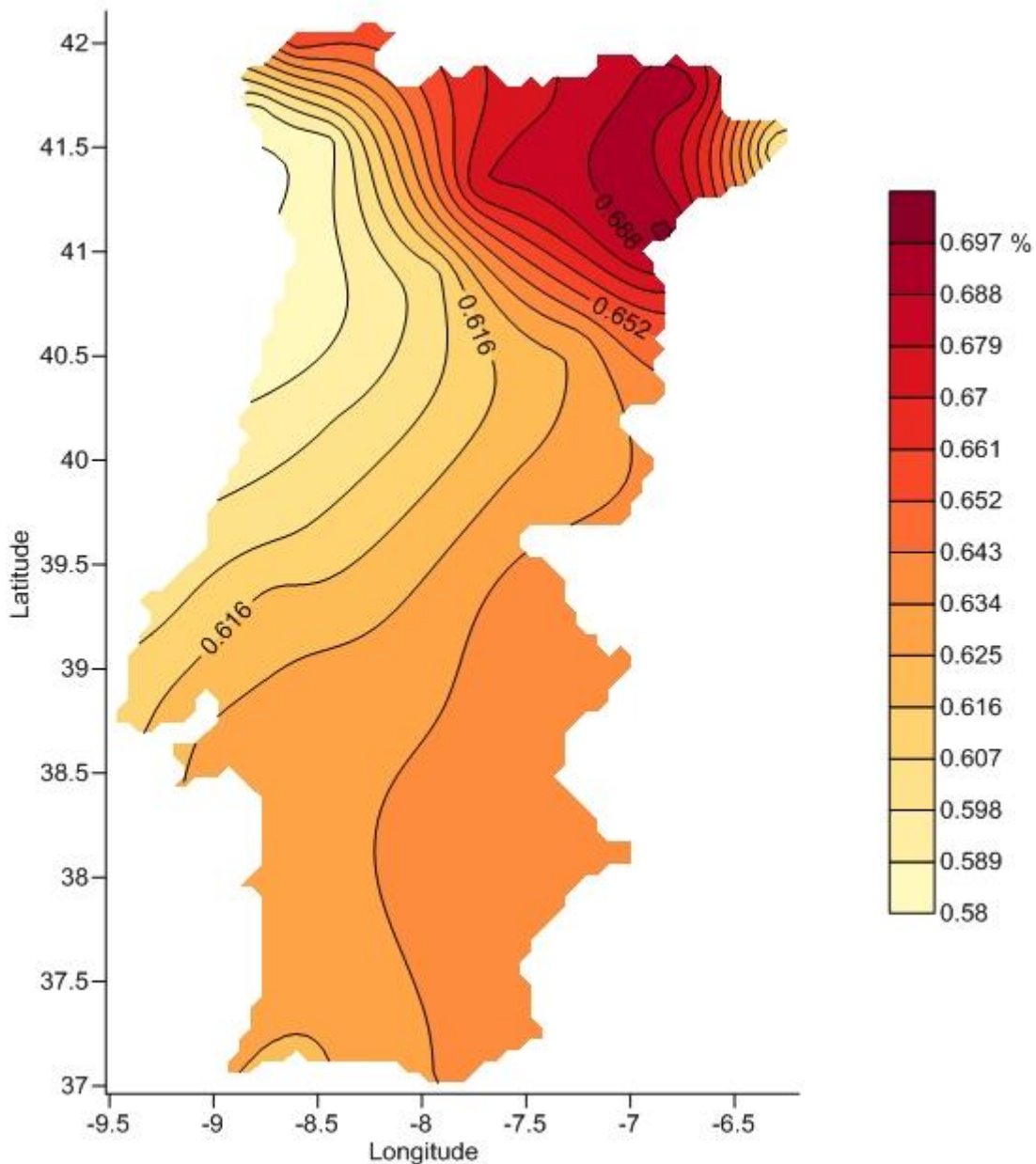


Figura 4.7 Rácio de Radiação directa horizontal existente na Radiação global horizontal

A natureza dos dados utilizados não é alheia aos resultados óbitos, na medida em que os dados retirados do *software* informático Solterm referem-se a valores de radiação solar estimada, não observada.

4.3.1. Ganhos de radiação solar em superfícies com seguimento comparativamente a superfícies estacionárias com inclinação óptima

É possível aumentar a energia retirada da radiação solar incidente no plano de uma superfície horizontal, com a aplicação de sistemas estacionários inclinados ou com sistemas de seguimento solar. Para o aproveitamento da radiação solar existente numa superfície horizontal a partir de sistemas estacionários inclinados, existe um valor óptimo em que se verifica o maior ganho de radiação solar. Com a aplicação do modelo desenvolvido chegou-se ao valor médio de inclinação óptima de 33 graus para Portugal Continental.

Nos dias de hoje, Portugal encontra-se entre os países com o maior desenvolvimento e maturação das tecnologias de aproveitamento de energia solar, como é caso dos sistemas solares térmicos e sistemas fotovoltaicos. Este lugar de relevo deve-se em parte às políticas europeias e nacionais pró energias renováveis, que fomentaram a aplicação de sistemas para aproveitamento de energia solar, contudo o sector da energia solar em Portugal é ainda muito subaproveitado. Pela análise da Figura 2.3 podemos facilmente verificar o aumento da potência fotovoltaica instalada desde o ano de 2008, data referente às primeiras instalações de sistemas fotovoltaicos no âmbito do decreto de lei da microprodução de electricidade. Na sua grande maioria os sistemas fotovoltaicos instalados são do tipo estacionário inclinado, pois têm custos de instalação inferior quando comparáveis a sistemas com seguimento e também pela falta de informação do possível ganho de radiação solar com a utilização de sistemas seguimento em detrimento de sistemas estacionários inclinados.

A Figura 4.8 apresenta a distribuição de radiação solar incidente numa superfície estacionária com inclinação óptima. Para uma possível aplicação de sistemas com seguimento em detrimento de sistemas estacionários, importa saber qual o ganho de radiação solar que advém dessa opção de utilização.

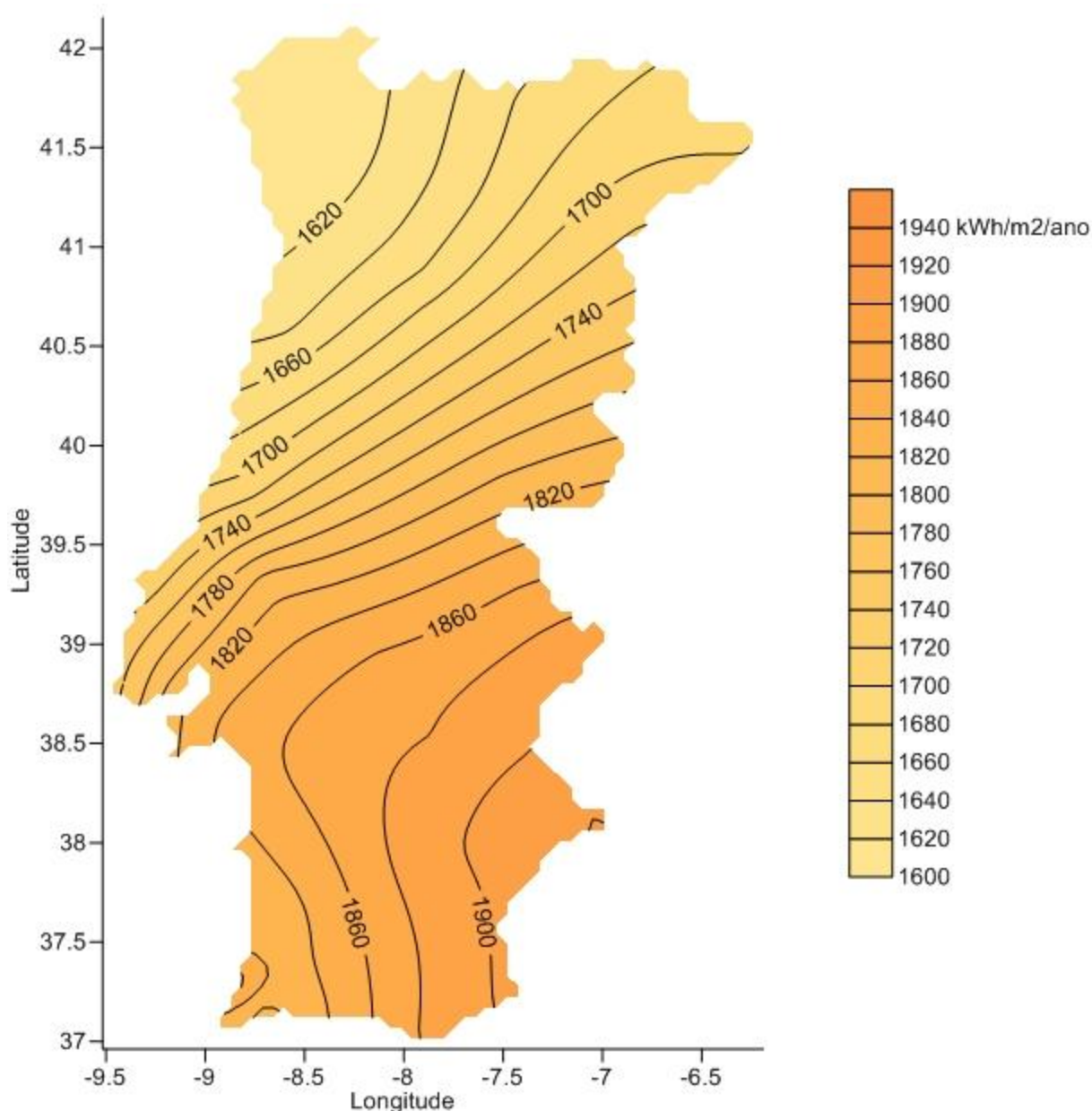


Figura 4.8 Radiação solar global anual incidente num plano estacionário com inclinação óptima

A Figura 4.9 apresenta o ganho de radiação solar em valores percentuais da utilização de uma superfície com seguimento a um eixo horizontal Este-Oeste comparativamente a uma superfície estacionária com inclinação óptima. Verifica-se que, com a utilização de seguimentos horizontais a um eixo Este-Oeste, o ganho de radiação solar encontra-se entre os 7,25% e 10,85%. É também visível uma diminuição gradual do ganho de radiação desde o Norte até ao centro, com valores que variam entre 10,85% e 8,75%. Por outro lado observa-se que o ganho de radiação aumenta do centro até ao Sul do País entre valores de 8,75% e os 10,25%.

No domínio da longitude é perceptível o aumento do ganho de radiação do litoral para o interior, desenvolvendo-se um padrão praticamente uniforme ao longo de Portugal Continental.

Com este tipo de seguimento para aproveitamento da radiação solar, a zonas de Portugal onde se verificam os maiores ganhos são a zona centro do Algarve e em praticamente toda a zona do interior Norte, em ambas as zonas encontram-se valores de ganho na ordem dos 10%. Por outro lado, é na

zona do grande Porto que se verificam os menores ganhos de radiação solar com a utilização de superfícies com seguimento a um eixo horizontal Este-Oeste, com resultados de pouco mais de 7%.

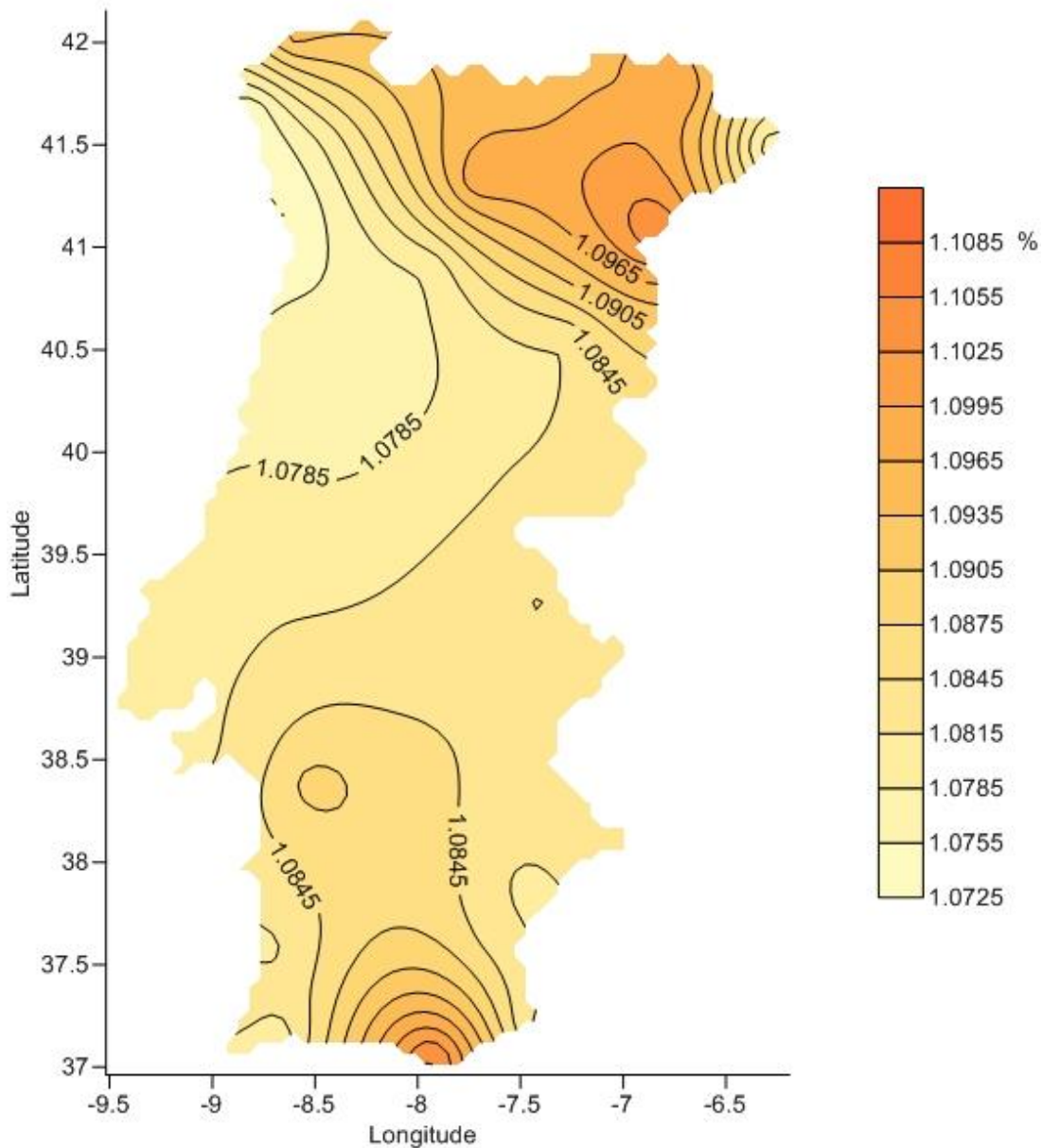


Figura 4.9 Ganho de radiação solar com a utilização de uma superfície com seguimento a um eixo horizontal Este-Oeste, em relação à radiação global numa superfície estacionária com inclinação óptima

Uma das razões para os resultados verificados, deve-se em parte aos maiores valores de radiação directa existentes na zona Norte do País em detrimento da zona Sul. Estes valores são utilizados pelo índice anisotrópico do modelo de Hay e Davies para aumentar a radiação directa na superfície inclinada. Para além do referido, a existência de maiores latitudes e inclinações dos sistemas estacionários no Norte do País, influenciam por sua vez o índice R_b e por consequente um aumento da radiação directa.

A Figura 4.10 apresenta a distribuição irradiação obtida, ou seja, a energia proveniente do Sol por unidade de área e medida no plano da superfície com seguimento a um eixo horizontal Este-Oeste.

Verifica-se que em superfícies com seguimento a um eixo horizontal Este-Oeste, a irradiação anual em Portugal varia entre 1720 kWh/m² e 2080 kWh/m².

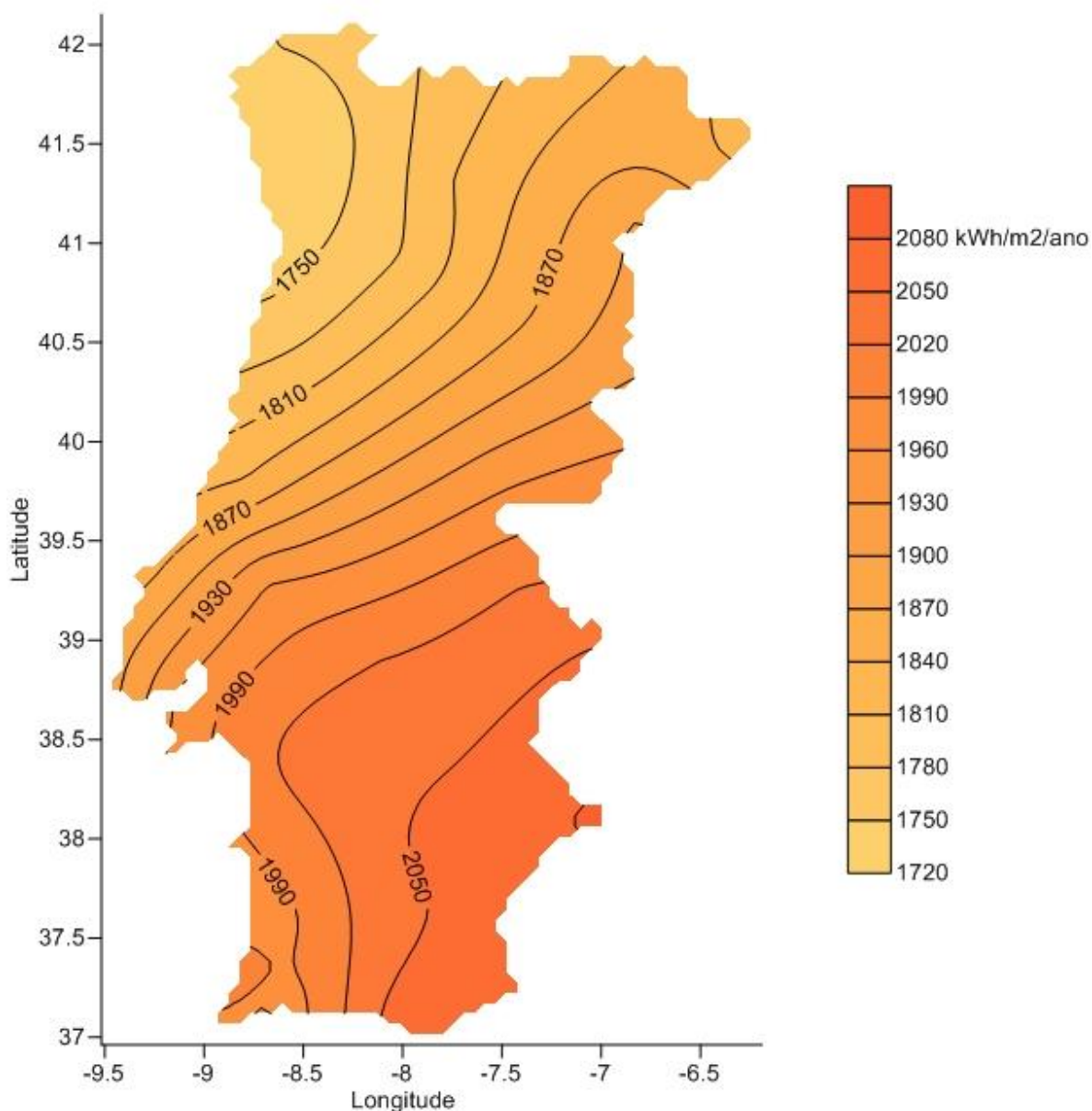


Figura 4.10 Radiação solar global anual incidente numa superfície com seguimento a um eixo horizontal Este-Oeste

Na análise do mapa conclui-se que para o seguimento em avaliação, a zona Sul de Portugal confere os maiores valores globais de radiação solar incidente. Verifica-se uma diminuição gradual da radiação solar do Sul para o Norte e um aumento da radiação do litoral para o interior. Obteve-se deste modo um padrão visual de radiações semelhantes para latitudes mais elevadas no interior em relação a latitudes mais baixas no litoral.

A Figura 4.11 mostra o ganho de radiação solar em valores percentuais na utilização de uma superfície com seguimento a um eixo horizontal Norte-Sul, comparativamente a uma superfície estacionária com inclinação óptima. Verifica-se que com a utilização de seguimentos horizontais a um eixo Norte-Sul o ganho de radiação solar varia entre os 15,1% e 24,56%.

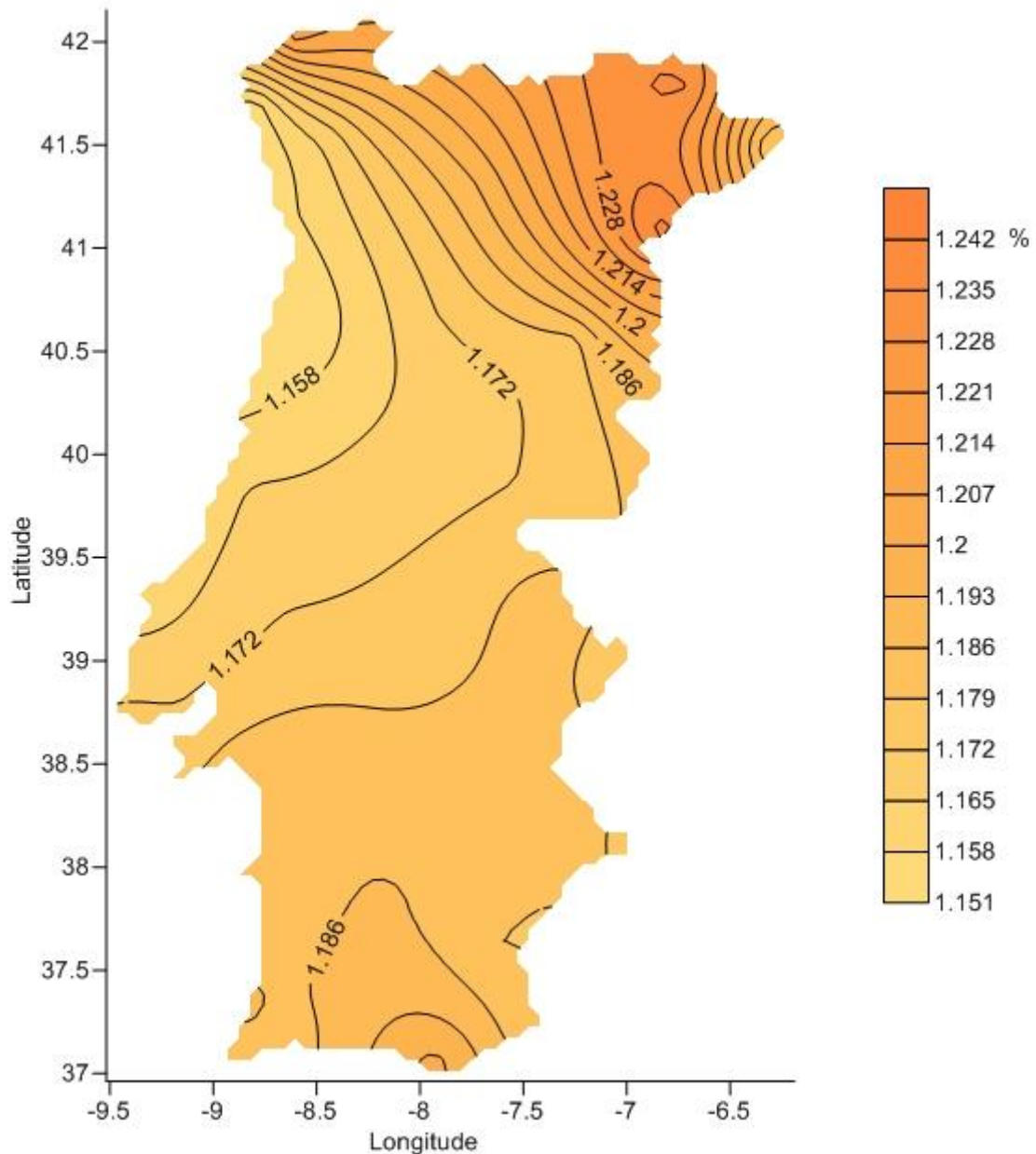


Figura 4.11 Ganho de radiação solar com a utilização de uma superfície com seguimento a um eixo horizontal Norte-Sul, em relação à radiação global numa superfície estacionária com inclinação óptima

Descendo em latitude no mapa da Figura 4.11 verifica-se uma diminuição do ganho de radiação solar do Norte do País até ao centro com valores que variam entre 24,56% e 16%. Continuando a descer em latitude verifica-se um aumento do ganho da radiação solar do centro do País até ao Sul, com valores a variar entre 16% e os 20%.

Longitudinalmente verifica-se um aumento do ganho de radiação do litoral para o interior, desenvolvendo-se um padrão praticamente uniforme ao longo de Portugal Continental.

Com este tipo de seguimento para aproveitamento da radiação solar, a zona de Portugal onde se verificam os maiores ganhos é a zona do Norte interior, com o pico desse ganho em Freixo de Espada à Cinta. Por outro lado a zona de Portugal com os ganhos inferiores de radiação solar situa-se na zona Aveiro-Porto, com mínimos a rondar os 15,1%.

Pela análise da Figura 4.12 constata-se que em superfícies com seguimento a um eixo horizontal Norte-Sul, a irradiação anual em Portugal varia entre 1840 kWh/m² e 2256 kWh/m².

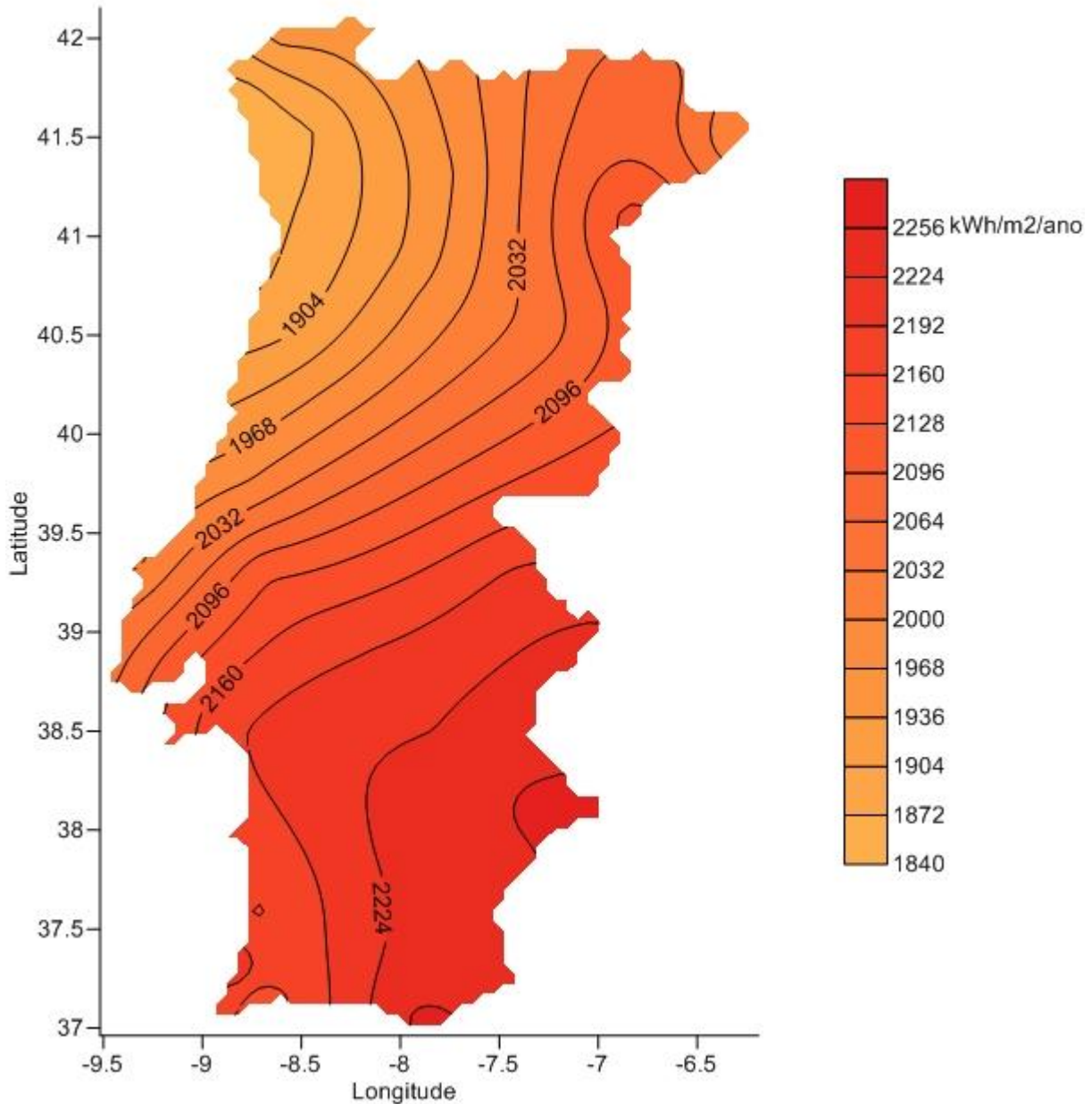


Figura 4.12 Radiação solar global anual incidente numa superfície com seguimento a um eixo horizontal Norte-Sul

Na análise do mapa verifica-se uma diminuição gradual da radiação global do Sul para o Norte do País e um aumento dessa radiação do litoral para o interior. É também perceptível neste seguimento em análise, que a zona Sul de Portugal apresenta os valores mais elevados de radiação solar global incidente e é na zona do litoral Norte que se verificam os valores mais baixos.

Observa-se pelo estudo da Figura 4.13 que com a utilização de uma superfície com seguimento azimutal, obtêm-se ganhos de radiação solar entre os 26% e 36%.

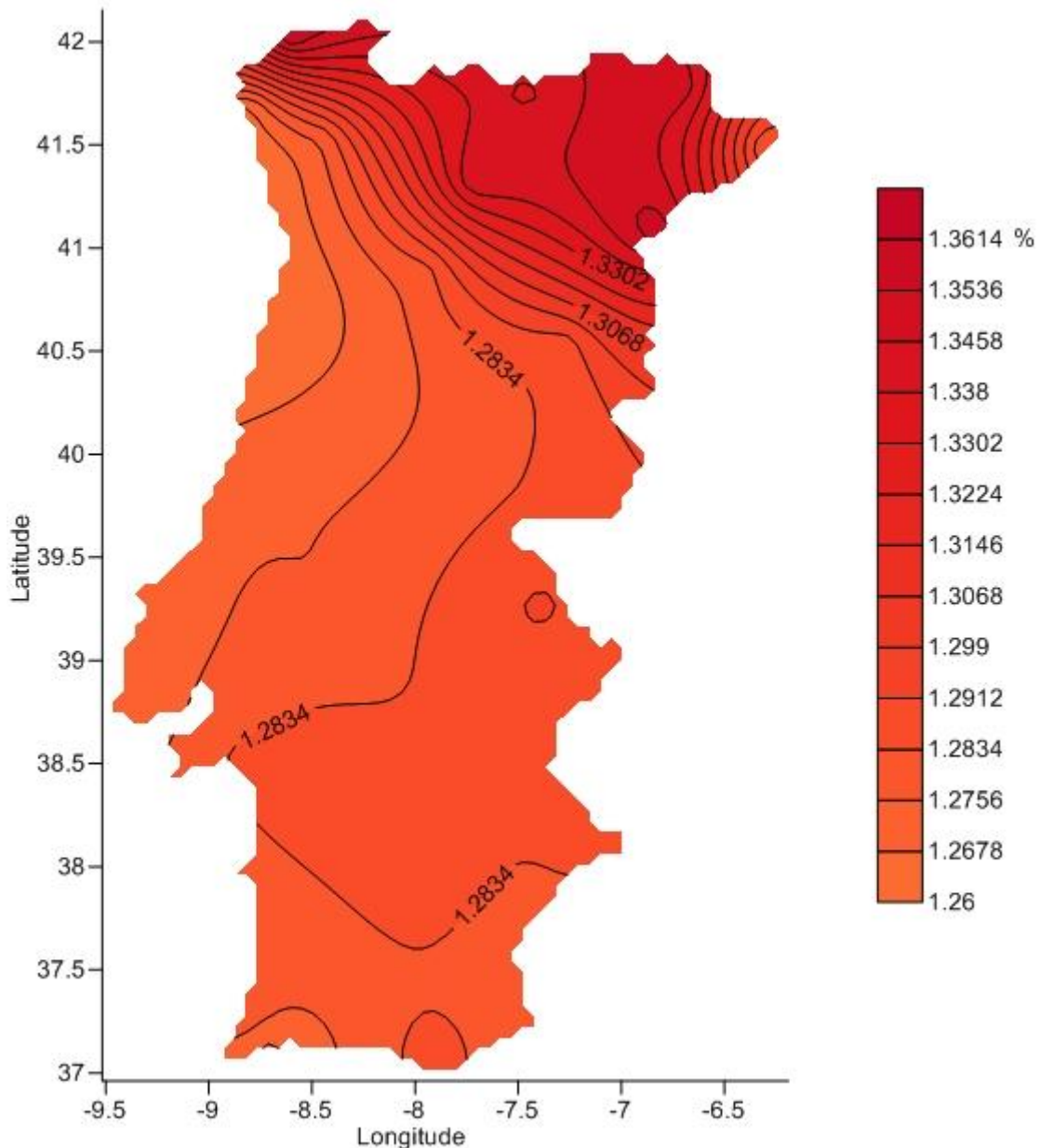


Figura 4.13 Ganho de radiação solar com a utilização de uma superfície com seguimento azimutal, em relação à radiação global numa superfície estacionária com inclinação óptima

Observando em latitude o mapa da Figura 4.13, verifica-se uma diminuição do ganho de radiação solar do Norte do País até ao centro, com valores que variam entre 36% e 28%. Por outro lado, é identificável após a análise do mapa, um aumento do ganho da radiação solar do Sul até ao centro do País, com valores a variar entre 28% e os 29%.

No domínio da longitude, ao exemplo dos mapas do ganho da radiação solar anteriores, continua-se a verificar um aumento do ganho de radiação do litoral para o interior, desenvolvendo-se um padrão praticamente uniforme ao longo de Portugal Continental.

Com este tipo de seguimento para aproveitamento da radiação solar, as zonas de Portugal onde se verificam os maiores ganhos, são as zonas do Norte interior e da região do Minho. Verificando-se o pico desse ganho em Valença do Minho. Por outro lado, a zona de Portugal com os ganhos inferiores de radiação solar situa-se na zona Aveiro-Porto, com mínimos a rondar os 26%.

Pela análise da Figura 4.14, relativa à radiação global incidente, verifica-se que em superfícies com seguimento azimutal, a irradiação anual em Portugal varia entre 2020 kWh/m² e 2475kWh/m².

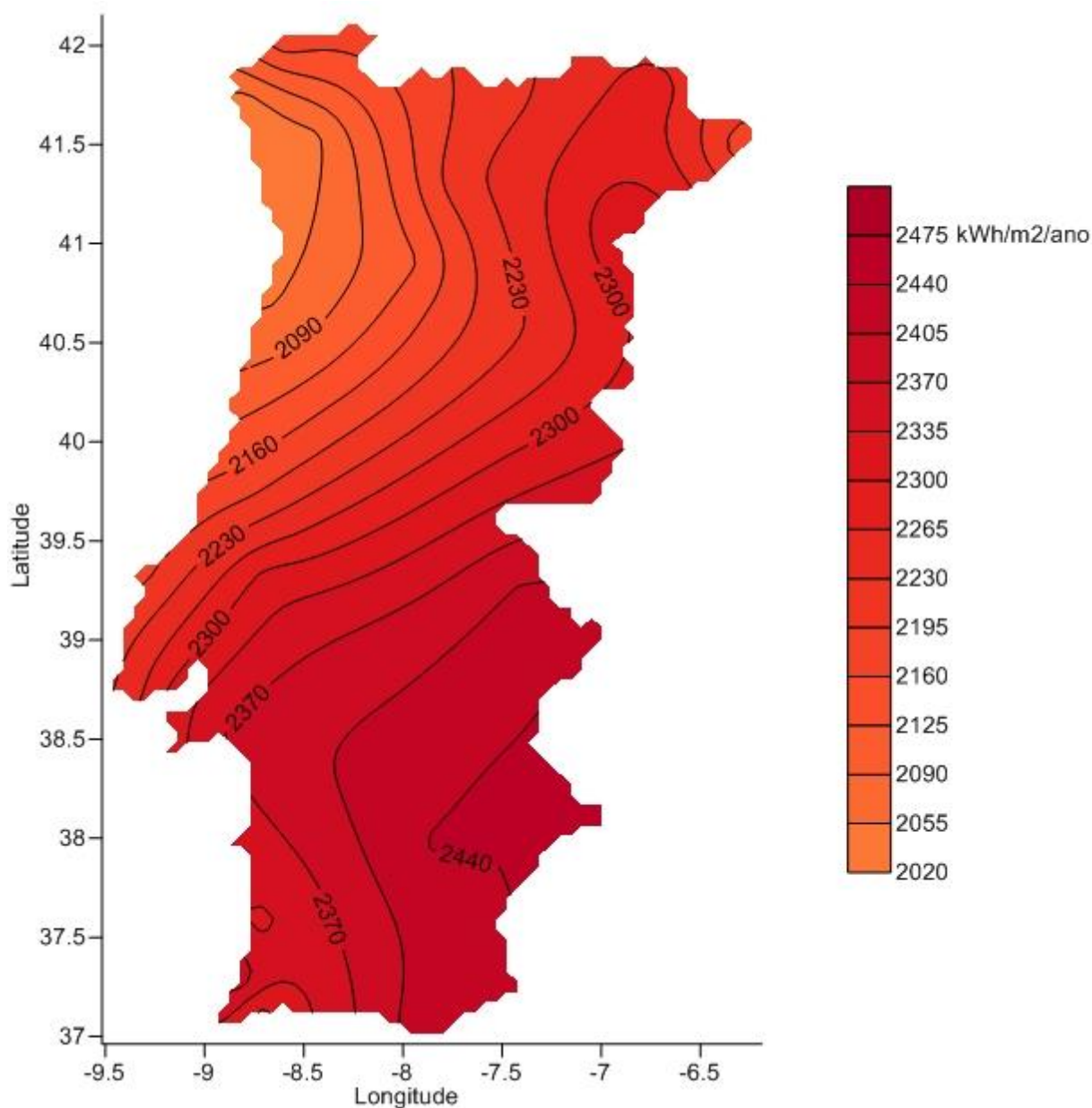


Figura 4.14 Radiação solar global anual incidente numa superfície com seguimento azimutal

Pela análise do mapa verifica-se uma diminuição gradual da radiação global quando se sobe em latitude e um aumento dessa radiação do litoral para o interior. É também perceptível que neste seguimento que é na zona Sul de Portugal que se verificam os valores mais elevados de radiação solar global incidente e na zona do litoral Norte se verificam os valores mais baixos.

Verifica-se pela análise da Figura 4.15 que a utilização de uma superfície com seguimento polar promove ganhos de radiação solar entre os 27% e 36,65%, comparativamente aos valores de radiação atingíveis com superfícies estacionárias com inclinação óptima.

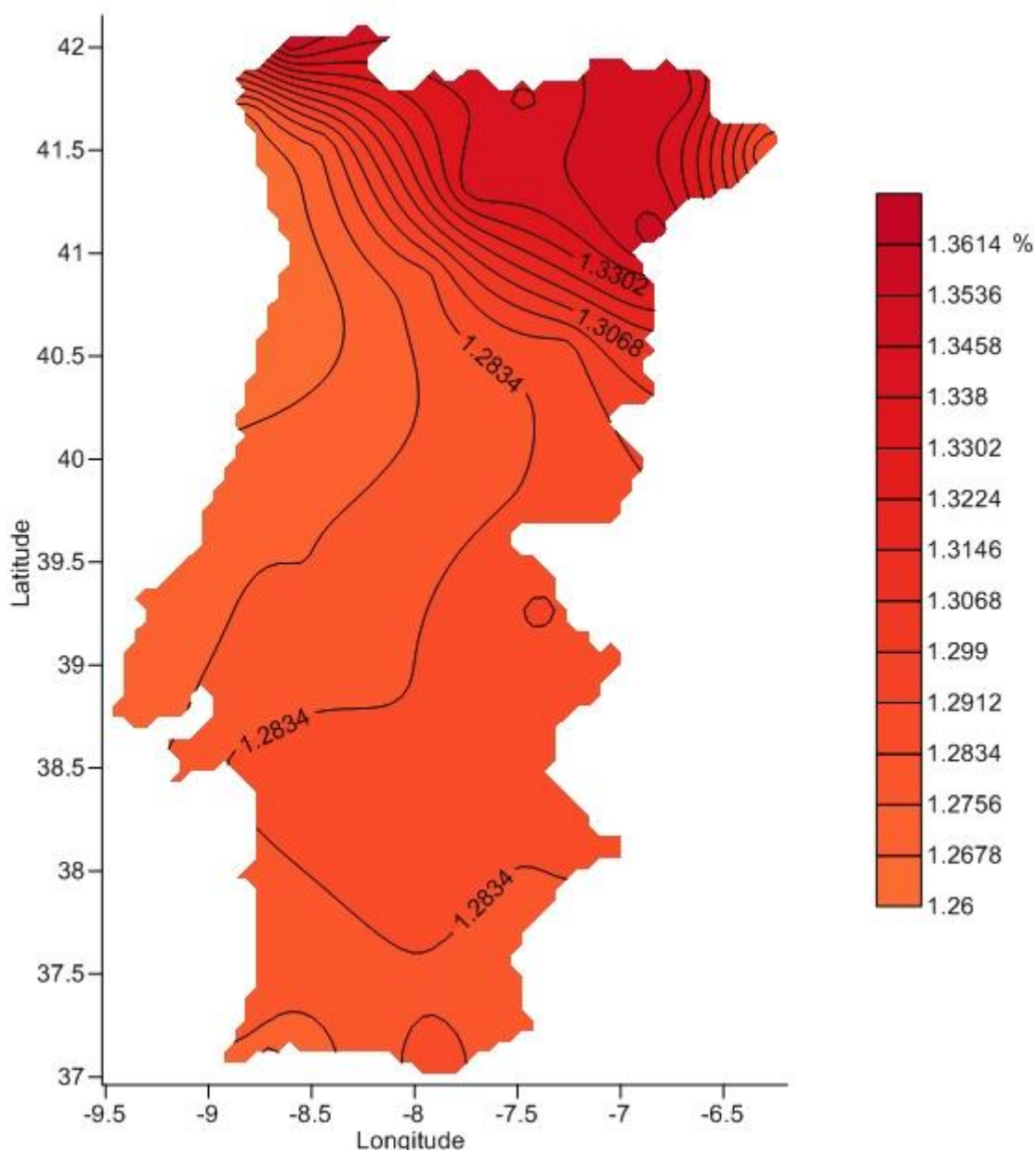


Figura 4.15 Ganho de radiação solar com a utilização de uma superfície com seguimento polar, em relação à radiação global numa superfície estacionária com inclinação óptima

Verifica-se uma diminuição do ganho de radiação solar do Norte do País até ao centro, com valores que variam entre 36% e 28%. Por outro lado, do centro para o Sul do País não é identificável na figura qualquer alteração no ganho da radiação mas na verdade existe um ténue aumento do ganho da radiação solar do centro do País até ao Sul, tal como indica a Tabela 4.1.

No domínio da longitude verifica-se um aumento do ganho de radiação do litoral para o interior, desenvolvendo-se um padrão praticamente uniforme ao longo de Portugal Continental.

Com este tipo de seguimento para aproveitamento da radiação solar, a zona de Portugal onde se verificam os maiores ganhos é a zona do Norte interior, atingindo o valor máximo em Freixo de Espada à Cinta. Por outro lado, a zona de Portugal com o ganho inferior de radiação solar situa-se na zona Aveiro-Porto, com mínimos a rondar os 27%.

Na análise da Figura 4.16 verifica-se que em superfícies com seguimento polar, a irradiação anual em Portugal varia entre 2040 kWh/m² e 2495kWh/m².

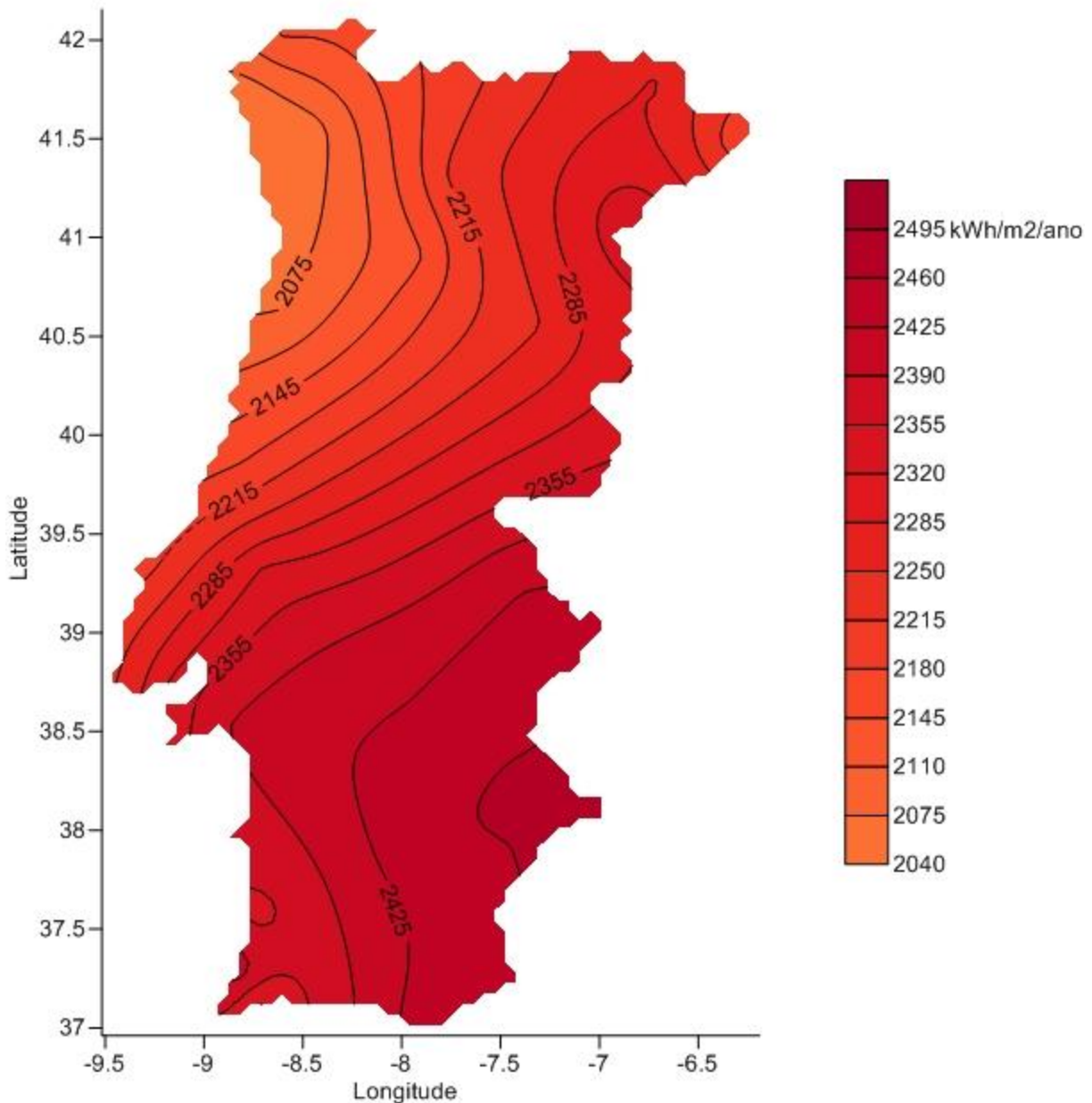


Figura 4.16 Radiação solar global anual incidente numa superfície com seguimento polar

Na análise do mapa verifica-se uma diminuição gradual da radiação global do Sul para o Norte e um aumento dessa radiação do litoral para o interior. É também perceptível que é na zona Sul de Portugal que se verificam os valores mais elevados de radiação solar global incidente e na zona do litoral Norte verificam-se os valores mais baixos.

Pela análise da Figura 4.17 verifica-se que a utilização de uma superfície com seguimento dois eixos promove ganhos de radiação solar entre os 30% e 41%, comparativamente aos valores de radiação atingíveis com superfícies estacionárias com inclinação óptima.

Descendo em latitude no mapa da Figura 4.17 verifica-se uma diminuição do ganho de radiação solar do Norte do País até ao centro, com valores que variam entre 41% e 32%. Por outro lado, não é identificável na figura qualquer alteração no ganho de radiação, pois este mantém-se praticamente constante do centro do País até ao Sul.

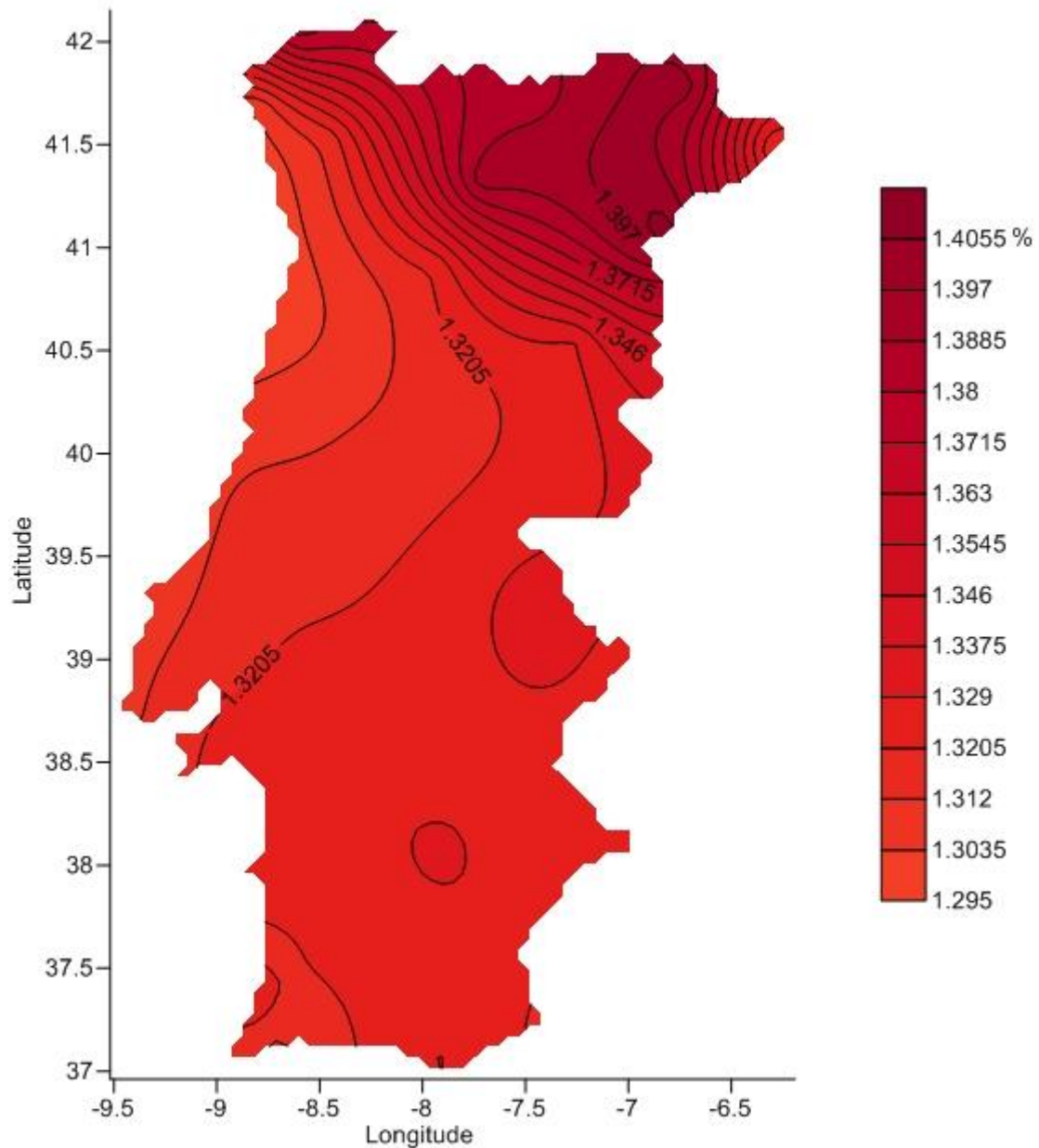


Figura 4.17 Ganho de radiação solar com a utilização de uma superfície com seguimento a dois eixos, em relação à radiação global numa superfície estacionária com inclinação óptima

Por outro lado, verifica-se um aumento do ganho de radiação do litoral para o interior, desenvolvendo-se um padrão praticamente constante ao longo de Portugal Continental.

Com este tipo de seguimento para aproveitamento da radiação solar, a zona de Portugal onde se verificam os maiores ganhos é a zona do Norte interior, com um pico de 41% a ser verificado em Freixo de Espada à Cinta. Por outro lado, a zona de Portugal com os ganhos inferiores de radiação solar situa-se na zona Aveiro-Porto, com mínimos a rondar os 30%.

Na análise da Figura 4.18 verifica-se que para superfícies com seguimento a dois eixos, a irradiação anual em Portugal varia entre 2080 kWh/m² e 2535 kWh/m². Verificando-se também uma diminuição gradual da radiação global do Sul para o Norte do País e um aumento dessa radiação do litoral para o interior. Observa-se ainda, que na zona Sul de Portugal se verificam os valores mais elevados de radiação solar global incidente e na zona do litoral Norte os valores mais baixos.

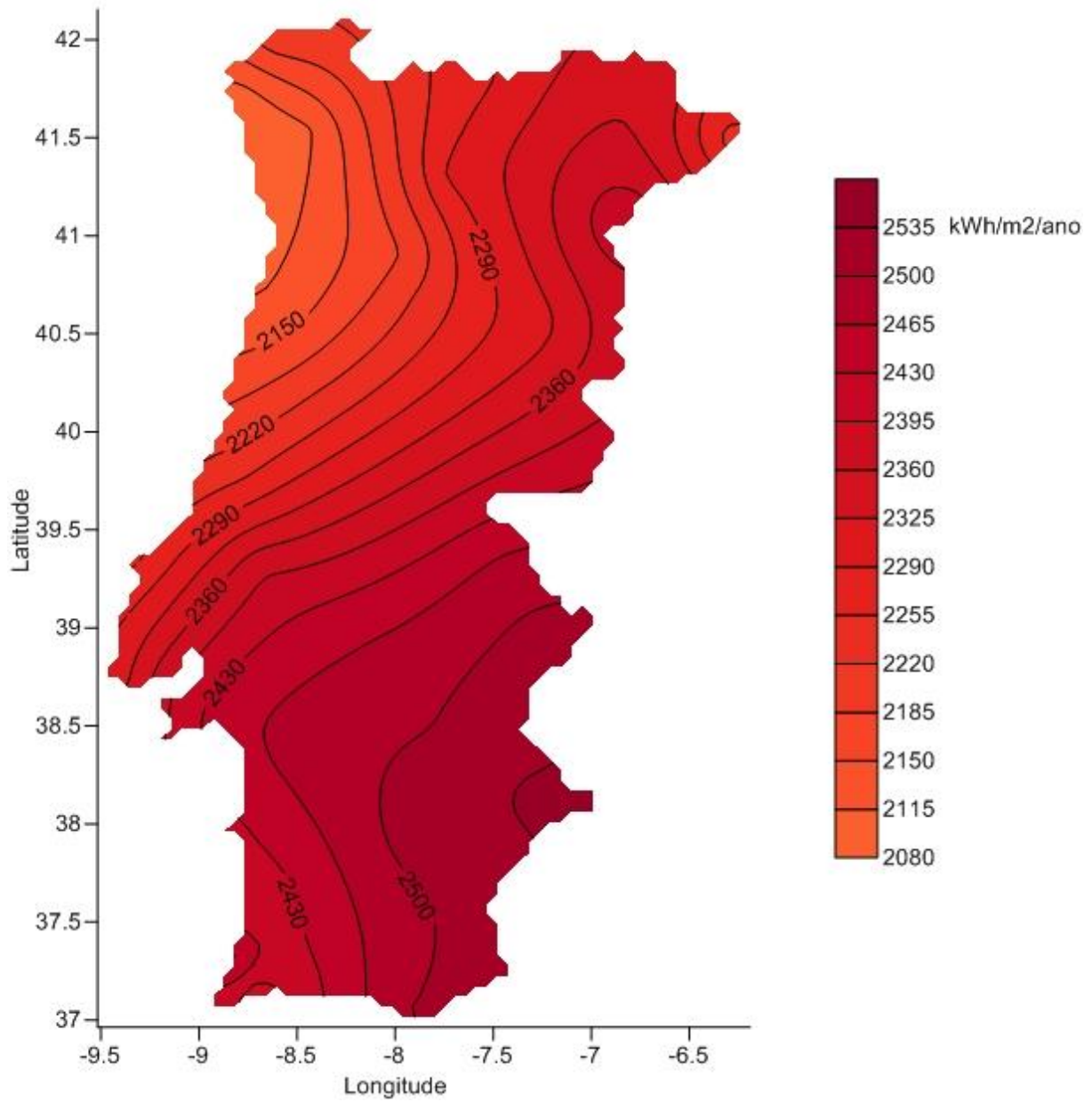


Figura 4.18 Radiação solar anual global incidente numa superfície com seguimento a dois eixos

Tabela 4.1 Ganho de radiação Solar em relação ao estacionário óptimo

Ganho de Radiação Solar em Relação a uma Superfície Estacionária com Inclinação Óptima (%)

Localidade	Longitude	Latitude	Seguimento a um eixo Horizontal Este - Oeste	Seguimento a um eixo Horizontal Norte - Sul	Seguimento Azimutal	Seguimento Polar	Seguimento a dois Eixos
Alcácer	-8,52	38,38	1,09	1,19	1,29	1,29	1,33
Aljezur	-8,84	37,3	1,08	1,19	1,28	1,29	1,33
Aveiro	-8,61	40,63	1,08	1,15	1,26	1,27	1,30
Barrancos	-7,04	38,14	1,08	1,18	1,28	1,29	1,33
Beja	-7,86	37,97	1,09	1,19	1,29	1,30	1,33
Braga	-8,44	41,54	1,08	1,17	1,28	1,29	1,32
Bragança	-6,7	41,78	1,10	1,24	1,35	1,36	1,40
Campo Maior	-7,04	39,03	1,08	1,18	1,29	1,29	1,33
Cascais	-9,42	38,72	1,08	1,17	1,27	1,28	1,31
Castelo Branco	-7,51	39,85	1,08	1,17	1,28	1,29	1,32
Castro Aire	-7,93	40,91	1,08	1,17	1,28	1,29	1,32
Chaves	-7,45	41,75	1,09	1,22	1,34	1,34	1,38
Coimbra	-8,42	40,2	1,08	1,16	1,27	1,28	1,31
Évora	-7,86	38,53	1,08	1,18	1,29	1,29	1,33
Faro	-7,93	37,04	1,11	1,20	1,29	1,30	1,33
Freixo de espada	-6,82	41,08	1,11	1,25	1,36	1,37	1,41
Guarda	-7,26	40,55	1,08	1,18	1,29	1,30	1,33
Lagos	-8,71	37,13	1,08	1,18	1,27	1,28	1,31
Leiria	-8,79	39,8	1,08	1,17	1,27	1,28	1,31
Lisboa	-9,15	38,73	1,08	1,17	1,27	1,28	1,32
Mértola	-7,65	37,64	1,08	1,18	1,28	1,29	1,32
Miranda do Douro	-6,31	41,49	1,08	1,18	1,28	1,29	1,32
Mora	-8,12	38,91	1,08	1,18	1,28	1,29	1,32
Moura	-7,28	38,1	1,08	1,18	1,29	1,29	1,33
Mourão	-7,28	38,36	1,08	1,18	1,29	1,29	1,33
Odemira	-8,72	37,57	1,08	1,18	1,28	1,29	1,32
Peniche	-9,32	39,33	1,08	1,16	1,27	1,28	1,31
Portalegre	-7,41	39,26	1,08	1,18	1,29	1,30	1,33
Porto	-8,62	41,16	1,07	1,16	1,26	1,27	1,30
Santarém	-8,69	39,31	1,08	1,17	1,28	1,29	1,32
Serpa	-7,46	37,91	1,08	1,18	1,28	1,29	1,32
Setúbal	-8,86	38,52	1,08	1,18	1,28	1,29	1,33
Sines	-8,84	37,95	1,08	1,18	1,28	1,29	1,32
Torres Novas	-8,55	39,51	1,08	1,17	1,28	1,28	1,32
Valença	-8,61	42,02	1,09	1,22	1,36	1,34	1,38
Viana do Castelo	-8,8	41,69	1,07	1,15	1,27	1,28	1,31
Vila Real	-7,72	41,32	1,10	1,19	1,34	1,35	1,39
Vinhais	-7,05	41,82	1,10	1,23	1,35	1,35	1,40
Viseu	-7,92	40,68	1,08	1,17	1,28	1,29	1,32
VRS António	-7,45	37,18	1,08	1,18	1,28	1,29	1,32

Tabela 4.2 Radiação global anual incidente no plano da superfície dos segumentos

Radiação Global Anual Incidente (kWh/m²/ano)

Cidades	Longitude	Latitude	Seguimento a um eixo Horizontal Este - Oeste	Seguimento a um eixo Horizontal Norte - Sul	Seguimento Azimutal	Seguimento Polar	Seguimento a dois Eixos
Alcácer	-8,52	38,38	2028,97	2210,30	2397,98	2413,20	2475,54
Aljezur	-8,84	37,3	2026,76	2220,55	2399,29	2414,71	2477,58
Aveiro	-8,61	40,63	1757,79	1879,66	2060,84	2075,32	2123,55
Barrancos	-7,04	38,14	2082,41	2261,83	2466,26	2481,30	2547,42
Beja	-7,86	37,97	2057,27	2247,42	2442,00	2457,27	2522,10
Braga	-8,44	41,54	1730,58	1872,48	2048,80	2062,09	2111,43
Bragança	-6,7	41,78	1853,42	2082,71	2277,27	2287,37	2359,73
Campo Maior	-7,04	39,03	2047,15	2225,64	2432,36	2445,78	2509,71
Cascais	-9,42	38,72	1899,92	2066,92	2235,67	2253,55	2307,57
Castelo Branco	-7,51	39,85	1947,45	2110,05	2309,56	2321,95	2381,68
Castro Aire	-7,93	40,91	1787,46	1945,49	2123,83	2137,15	2190,50
Chaves	-7,45	41,75	1815,64	2020,90	2217,96	2227,66	2295,81
Coimbra	-8,42	40,2	1822,43	1967,77	2151,05	2166,47	2218,19
Évora	-7,86	38,53	2039,56	2221,53	2417,32	2431,98	2495,68
Faro	-7,93	37,04	2081,00	2260,69	2419,03	2436,23	2500,14
Freixo de espada	-6,82	41,08	1903,52	2144,24	2339,29	2352,45	2428,60
Guarda	-7,26	40,55	1881,49	2047,04	2240,98	2252,92	2310,93
Lagos	-8,71	37,13	1951,96	2135,54	2292,37	2317,54	2372,29
Leiria	-8,79	39,8	1842,36	1990,13	2175,31	2191,74	2243,84
Lisboa	-9,15	38,73	1960,47	2128,64	2313,84	2332,00	2390,59
Mértola	-7,65	37,64	2054,41	2236,18	2429,18	2443,74	2506,73
Miranda do Douro	-6,31	41,49	1829,01	2002,40	2179,68	2193,31	2244,19
Mora	-8,12	38,91	2018,96	2193,17	2390,08	2404,42	2467,27
Moura	-7,28	38,1	2077,28	2266,36	2465,89	2481,94	2546,80
Mourão	-7,28	38,36	2062,33	2248,85	2447,74	2462,72	2526,93
Odemira	-8,72	37,57	1967,86	2156,42	2327,14	2345,10	2402,06
Peniche	-9,32	39,33	1858,87	1998,99	2185,01	2200,55	2252,88
Portalegre	-7,41	39,26	2020,42	2201,45	2407,41	2419,97	2484,54
Porto	-8,62	41,16	1729,24	1865,85	2038,45	2052,53	2100,04
Santarém	-8,69	39,31	1956,17	2119,39	2312,50	2327,07	2386,56
Serpa	-7,46	37,91	2059,64	2248,54	2441,50	2458,35	2520,00
Setúbal	-8,86	38,52	2002,03	2186,33	2376,69	2392,07	2453,33
Sines	-8,84	37,95	1983,37	2165,65	2345,82	2361,02	2420,76
Torres Novas	-8,55	39,51	1921,09	2079,65	2269,81	2285,54	2341,83
Valença	-8,61	42,02	1752,58	1948,24	2179,68	2148,03	2212,05
Viana do Castelo	-8,8	41,69	1720,97	1850,61	2031,99	2045,83	2092,09
Vila Real	-7,72	41,32	1813,05	1969,68	2218,09	2229,30	2297,68
Vinhais	-7,05	41,82	1834,87	2063,27	2256,38	2264,72	2335,74
Viseu	-7,92	40,68	1813,05	1969,68	2151,87	2166,61	2219,35
VRS António	-7,45	37,18	2058,95	2248,34	2433,71	2450,50	2512,93

5. Conclusões e Trabalho Futuro

Neste trabalho pretendeu-se desenvolver um modelo que permitisse estudar o comportamento da radiação solar em superfícies estacionárias inclinadas e em superfícies com seguimento. Incidiu-se particularmente no estudo de superfícies com seguimento solar e na avaliação do benefício da sua utilização comparativamente às superfícies estacionárias inclinadas.

A partir do trabalho elaborado é possível concluir o seguinte:

- No Sul do País verificam-se os maiores valores de radiação solar global incidente no plano da superfície de qualquer um dos seguimentos estudados;
- No Nordeste do País verificam-se os maiores rácios entre os valores de radiação solar directa em relação à global incidente numa superfície inclinada estacionária ou com seguimento;
- É também no Norte do País que se verificam os maiores ganhos existentes na comparação da radiação incidente no plano de uma superfície inclinada e no plano da superfície em qualquer seguimento solar estudado;
- A média do ganho verificado em Portugal Continental com a utilização de superfícies com seguimentos solar comparativamente a superfícies estacionárias com inclinação óptima é:

Média Portugal Continental do Ganho de Radiação Global em relação ao Estacionário Ótimo (%)				
Superfície com seguimento solar a um eixo Horizontal Este - Oeste	Superfície com seguimento solar a um eixo Horizontal Norte - Sul	Superfície com seguimento solar a um eixo Azimutal	Superfície com seguimento solar a um eixo Polar	Superfície com seguimento Dois Eixos
1,08	1,18	1,29	1,30	1,33

- Na localização das duas maiores centrais fotovoltaicas portuguesas constata-se ganhos de radiação global, em relação ao estacionário óptimo, de 18% em Serpa com o seguimento solar a um eixo horizontal Norte-Sul e de 29% em Moura com o seguimento solar azimutal. Uma possível troca destes dois seguimentos pelo seguimento mais produtivo, o seguimento a dois eixos, iria resultar num ganho de radiação de 4% em Moura e de 14% em Serpa;
- A utilização de dados estimados de radiação solar não é alheia a alguns dos resultados menos espectáveis atingidos com esta metodologia, bem como a utilização do modelo anisotrópico de Hay e Davies;
- Observou-se na execução desta dissertação que a irradiação directa incidente numa superfície horizontal, é significativamente elevada com a utilização de superfícies com seguimento solar. Esse aumento da percentagem de radiação directa disponível, poderá ser utilizado em células fotovoltaicas com rendimentos mais elevados a partir da aplicação de sistemas fotovoltaicos concentradores;
- Os resultados obtidos demonstram que a integração em edifícios de micro sistemas fotovoltaicos, baseados em superfícies com seguimento, poderá ser uma das aplicações futuras. A aplicação de micro sistemas em fachadas resultará em sistemas de sombreamento e em sistemas produtores de energia eléctrica. Por exemplo, a utilização de micro sistemas com seguimento horizontal Este-Oeste numa fachada orientada a Sul, não só promove o sombreamento como também a produção de energia eléctrica.

Dando continuidade ao trabalho realizado sugere-se efectuar como trabalho futuro as seguintes tarefas:

- Aplicar a metodologia desenvolvida a dados observados a nível nacional de radiação solar nas suas três componentes;
- Utilizar os dados de radiação incidente no plano, em métodos de cálculo de energia eléctrica anual, a partir das mais conhecidas/utilizadas tecnologias;
- Desenvolver uma interface gráfica em MATLAB para possibilitar a fácil utilização do modelo para um qualquer utilizador;
- Como resultado da aplicação do modelo a dados observados, efectuar mapeamento em grelhas regulares.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Abella M., Chenlo F.. Estimación de la Energia Generada por un Sistema Fotovoltaico Conectado a Red. Acedido em Janeiro 2011, em: <http://oretano.iele-ab.uclm.es/>
- [2] Andreas A., Reda I., (2008). Solar Position Algorithm for Solar radiation Applications. National Renewable Energy Laboratory.
- [3] Andreev V., Luque A. (2007). Concentrator Photovoltaic. Springer, Berlin.
- [4] Appleyard D. (2009). Solar Trackers: Facing the Sun [Versão electronic]. Renewable Energy World Magazine. Acedido em Maio de 2011.
- [5] Baba H., Knayama K., (1987). Estimation of Solar Radiation on a Tilted Surface with any Inclination and Direction Angle. Memoirs og the Kitame Institute of Technology. Vol. 18 N°.2
- [6] Barbero A., Belmonte A., Walsh K.. Movements of the Earth. Acedido em Agosto 2011, em: <http://www.uclm.es/>
- [7] Beckman W., Duffie J, (1991), Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York
- [8] Bilbao J., Miguel A., Mediavilla M., (2005). Measurement and comparison of difuse solar irradiance models on inclined surfaces in Valladolid. Solar Energy. 46:2075-2092
- [9] Bird R., Hulstrom R., (1981). A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces. Solar Energy Research Institute, Colorado.
- [10] Blas M., Garcia A., Torres J., (2006). New equations of the calculation of the horizon brightness irradiance in the model of Perez. Solar Energy. 80: 746-750
- [11] Castaner L., Markvart T. (2000), Practical Handbook of Photovoltaic Fundamentals and Applications. Elsevier, New York.
- [12] Coelho S., R. Costa, Galhetas A., Mateus C., Teixeira A.. Caracterização de uma célula solar de silício policristalino. Faculdade de Ciências – Universidade de Lisboa.
- [13] Corkish R., Green M., Watt M., Wenham S. (2007). Applied Photovoltaics. 2nd ed, Earthscan, London.
- [14] Costa J. Horta P. Spencer S., (2006). Curso de Projectistas e de Instaladores de Equipamento Solar Térmico, INETI
- [15] Deutsche Gesellschaft Fur Sonnenenergie (2008). Planning and Installing Photovoltaic Systems – A guide for installers, architects and engineers. 2nd ed., Earthscan, London.
- [16] Directiva 2001/77/CE de 27 de Setembro. Jornal Oficial das Comunidades Europeias. L 283.
- [17] Directiva 2009/28/CE de 23 de Abril. Jornal Oficial da União Europeia. L 140.
- [18] Dubey S., Tiwari G., (2010). Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications. The Royal Society of Chemistry, Cambridge
- [19] Felsmann C., Frank T., Loutzenhiser P., Manz H., Maxwell G., Strachan P. (2007). Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. Solar Energy. 81:254-267.
- [20] Gibson T., Kelly N., (2009). Improved photovoltaic energy output for cloudy conitions with a solar tracking system. Solar Energy. 83:2092-2012.
- [21] Hegedus S, Luque A. (2003). Handbook of Photovoltaics Science and Engineering, John Wiley & Sons, England

- [22] Howell J., Siegel R. (1992). *Thermal Radiation Heat Transfer*. 3rd ed., Hemisphere, New York.
- [23] <http://www.maproyalty.com/solar.html>, acessido em Janeiro de 2011.
- [24] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>, acessido em Novembro de 2010.
- [25] <http://www.dgge.pt/>, acessido em Setembro de 2011
- [26] <http://www.ffienergy.com/>, acessido em Julho de 2011
- [27] <http://www.cbdenergy.com.au>, acessido em Junho de 2011
- [28] <http://www.rids-nepal.org>, acessido em Junho de 2011
- [29] <http://www.kippzonen.com/>, acessido em Setembro de 2011
- [30] <http://us.sunpowercorp.com/>, acessido em Setembro de 2011
- [31] Instituto Geográfico Português (2005). *Atlas de Portugal*. Acessido em Setembro de 2011, em: <http://62.48.187.114/snig-educ/>.
- [32] Kalogirou S. (2009). *Solar Energy Engineering Processes and Systems*. Elsevier, London
- [33] Kamali G., Moradi I., Noorian A., (2008). Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. *Solar Energy*. 33:1406-1412.
- [34] Liou K., (2002). *An Introduction to Atmospheric Radiation*. 2nd ed., Elsevier, London
- [35] Lynn P. (2010). *Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics*, John Wiley & Sons, Chichester
- [36] Marzia E., (1979). *Passive Solar Energy Book*. Rodale Presse, USA
- [37] Maso P. (2007). Parque fotovoltaico de Serpa. Acessido em Maio de 2011, em: <http://www.catavento.pt/uk/default.asp> e Central solar fotovoltaica de Amareleja. Acessido em Maio de 2011, em: <http://www.accion-energy.com/>
- [38] Maxwell E., (1987). *A Quasi-Physical Model for converting Hourly Global Horizontal to Direct Normal Insolation*. Solar Energy Research Institute, Colorado.
- [39] Muneer T. (2000). *Solar Radiation and Daylight Models*. Elsevier, London.
- [40] Neville R. (1995). *Solar Energy Conversion – The Solar Cell*. 2nd ed., Elsevier, Amsterdam
- [41] Nijs J.. *Photovoltaic Solar Energy: present and future*. Acessido em Julho 2011, em: <http://www.clubofrome.at/events/lectures/58/pdf1.pdf>.
- [42] Nunes Rodrigues, C. (1996). *Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Autónomos*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa. 103 pp.
- [43] Pandey C., Katiyar A. (2011). A Comparative Study of Solar Irradiation Models on Various Inclined Surfaces for India. *Applied Energy*. 88:1455-1459.
- [44] PNAER 2010: Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis ao Abrigo da Directiva 2009/28/CE.
- [45] *Renováveis – Estatísticas rápidas Junho 2011*, n° 76, Direcção Geral de Energia e Geologia
- [46] Sen Z., (2008), *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*. Springer, London

ANEXOS

ANEXO I – Ganho de Radiação Solar em relação à Superfície Horizontal

Comparação de Métodos de Seguimento Solar para Sistemas Fotovoltaicos

Ganho de Radiação Solar em relação a uma Superfície Horizontal (%)

Cidades	Longitude	Latitude	Estacionário Inclinação Ótima	Seguimento a um eixo Horizontal Este - Oeste	Seguimento a um eixo Horizontal Norte - Sul	Seguimento Azimutal	Seguimento Polar	Seguimento a dois Eixos
Alcácer	-8,52	38,38	1,09	1,19	1,30	1,41	1,42	1,45
Aljezur	-8,84	37,3	1,09	1,18	1,29	1,40	1,40	1,44
Aveiro	-8,61	40,63	1,11	1,20	1,28	1,40	1,41	1,45
Barrancos	-7,04	38,14	1,10	1,20	1,30	1,42	1,43	1,46
Beja	-7,86	37,97	1,10	1,19	1,30	1,41	1,42	1,46
Braga	-8,44	41,54	1,11	1,20	1,30	1,42	1,43	1,46
Bragança	-6,7	41,78	1,12	1,23	1,38	1,51	1,52	1,56
Campo Maior	-7,04	39,03	1,11	1,20	1,30	1,43	1,43	1,47
Cascais	-9,42	38,72	1,09	1,18	1,28	1,39	1,40	1,43
Castelo Branco	-7,51	39,85	1,11	1,20	1,30	1,42	1,43	1,47
Castro Aire	-7,93	40,91	1,11	1,20	1,30	1,42	1,43	1,47
Chaves	-7,45	41,75	1,12	1,23	1,37	1,50	1,51	1,55
Coimbra	-8,42	40,2	1,11	1,20	1,29	1,41	1,42	1,46
Évora	-7,86	38,53	1,10	1,19	1,30	1,41	1,42	1,46
Faro	-7,93	37,04	1,09	1,20	1,31	1,40	1,41	1,44
Freixo de espada	-6,82	41,08	1,11	1,23	1,38	1,51	1,52	1,57
Guarda	-7,26	40,55	1,11	1,20	1,31	1,43	1,44	1,48
Lagos	-8,71	37,13	1,08	1,17	1,28	1,37	1,39	1,42
Leiria	-8,79	39,8	1,11	1,20	1,29	1,41	1,42	1,46
Lisboa	-9,15	38,73	1,10	1,19	1,29	1,40	1,41	1,45
Mértola	-7,65	37,64	1,09	1,19	1,29	1,40	1,41	1,45
Miranda do Douro	-6,31	41,49	1,10	1,19	1,30	1,41	1,42	1,46
Mora	-8,12	38,91	1,10	1,19	1,30	1,41	1,42	1,46
Moura	-7,28	38,1	1,10	1,19	1,30	1,42	1,43	1,46
Mourão	-7,28	38,36	1,10	1,19	1,30	1,42	1,42	1,46
Odemira	-8,72	37,57	1,09	1,17	1,29	1,39	1,40	1,43
Peniche	-9,32	39,33	1,11	1,19	1,28	1,40	1,41	1,45
Portalegre	-7,41	39,26	1,11	1,20	1,31	1,43	1,44	1,48
Porto	-8,62	41,16	1,11	1,19	1,29	1,41	1,42	1,45
Santarém	-8,69	39,31	1,11	1,20	1,30	1,41	1,42	1,46
Serpa	-7,46	37,91	1,10	1,19	1,30	1,41	1,42	1,45
Setúbal	-8,86	38,52	1,10	1,19	1,30	1,41	1,42	1,46
Sines	-8,84	37,95	1,09	1,18	1,29	1,40	1,41	1,44
Torres Novas	-8,55	39,51	1,11	1,20	1,29	1,41	1,42	1,46
Valença	-8,61	42,02	1,12	1,23	1,37	1,53	1,51	1,55
Viana do Castelo	-8,8	41,69	1,12	1,20	1,29	1,42	1,43	1,46
Vila Real	-7,72	41,32	1,11	1,22	1,33	1,50	1,51	1,55
Vinhais	-7,05	41,82	1,12	1,23	1,38	1,51	1,51	1,56
Viseu	-7,92	40,68	1,11	1,20	1,30	1,42	1,43	1,47
VRS António	-7,45	37,18	1,09	1,18	1,29	1,40	1,41	1,44

ANEXO II – Quantidade de Radiação Directa existente na Radiação Global

Quantidade de Radiação Directa existente na Radiação Global (%)

Cidades	Longitude	Latitude	Estacionário Inclinação Ótima	Seguimento a um eixo Horizontal Este - Oeste	Seguimento a um eixo Horizontal Norte - Sul	Seguimento Azimutal	Seguimento Polar	Seguimento a dois Eixos
Alcácer	-8,52	38,38	0,78	0,80	0,82	0,83	0,83	0,84
Aljezur	-8,84	37,3	0,78	0,80	0,82	0,83	0,83	0,84
Aveiro	-8,61	40,63	0,74	0,76	0,78	0,80	0,80	0,81
Barrancos	-7,04	38,14	0,79	0,81	0,83	0,84	0,84	0,85
Beja	-7,86	37,97	0,78	0,81	0,83	0,84	0,83	0,85
Braga	-8,44	41,54	0,74	0,77	0,79	0,80	0,80	0,82
Bragança	-6,7	41,78	0,81	0,83	0,85	0,86	0,86	0,87
Campo Maior	-7,04	39,03	0,78	0,81	0,83	0,84	0,83	0,85
Cascais	-9,42	38,72	0,76	0,78	0,81	0,81	0,81	0,83
Castelo Branco	-7,51	39,85	0,78	0,80	0,82	0,83	0,83	0,84
Castro Aire	-7,93	40,91	0,76	0,78	0,80	0,81	0,81	0,83
Chaves	-7,45	41,75	0,80	0,82	0,84	0,85	0,85	0,86
Coimbra	-8,42	40,2	0,75	0,77	0,80	0,81	0,81	0,82
Évora	-7,86	38,53	0,78	0,80	0,83	0,83	0,83	0,85
Faro	-7,93	37,04	0,78	0,81	0,83	0,83	0,83	0,84
Freixo de espada	-6,82	41,08	0,82	0,84	0,86	0,87	0,87	0,88
Guarda	-7,26	40,55	0,77	0,80	0,82	0,83	0,83	0,84
Lagos	-8,71	37,13	0,76	0,79	0,81	0,82	0,82	0,83
Leiria	-8,79	39,8	0,75	0,78	0,80	0,81	0,81	0,82
Lisboa	-9,15	38,73	0,77	0,79	0,81	0,82	0,82	0,84
Mértola	-7,65	37,64	0,78	0,80	0,83	0,83	0,83	0,85
Miranda do Douro	-6,31	41,49	0,74	0,77	0,79	0,81	0,80	0,82
Mora	-8,12	38,91	0,78	0,80	0,82	0,83	0,83	0,84
Moura	-7,28	38,1	0,79	0,81	0,83	0,84	0,84	0,85
Mourão	-7,28	38,36	0,79	0,81	0,83	0,84	0,84	0,85
Odemira	-8,72	37,57	0,77	0,79	0,82	0,82	0,82	0,84
Peniche	-9,32	39,33	0,75	0,78	0,80	0,81	0,81	0,82
Portalegre	-7,41	39,26	0,79	0,81	0,83	0,84	0,84	0,85
Porto	-8,62	41,16	0,74	0,76	0,78	0,80	0,80	0,81
Santarém	-8,69	39,31	0,77	0,79	0,81	0,82	0,82	0,84
Serpa	-7,46	37,91	0,78	0,80	0,83	0,83	0,83	0,85
Setúbal	-8,86	38,52	0,78	0,80	0,82	0,83	0,83	0,84
Sines	-8,84	37,95	0,77	0,80	0,82	0,83	0,82	0,84
Torres Novas	-8,55	39,51	0,76	0,79	0,81	0,82	0,82	0,83
Valença	-8,61	42,02	0,79	0,81	0,83	0,81	0,84	0,85
Viana do Castelo	-8,8	41,69	0,74	0,76	0,79	0,80	0,80	0,81
Vila Real	-7,72	41,32	0,80	0,78	0,80	0,85	0,85	0,86
Vinhais	-7,05	41,82	0,81	0,83	0,85	0,86	0,86	0,87
Viseu	-7,92	40,68	0,76	0,78	0,80	0,81	0,81	0,83
VRS António	-7,45	37,18	0,78	0,80	0,83	0,83	0,83	0,85

ANEXO III – Declinação Solar, Altitude Solar, Nascer e Pôr-do-sol e Comprimento do Dia (Lisboa)

Comparação de Métodos de Seguimento Solar para Sistemas Fotovoltaicos

DIA	Janeiro					Fevereiro					Março				
	Decli. Solar (°)	Nascer (h:m)	Ocaso (h:m)	Comp. Dia (h:m)	Alt. Max. Sol (°)	Decli. Solar (°)	Nascer (h:m)	Ocaso (h:m)	Comp. Dia (h:m)	Alt. Max. Sol (°)	Decli. Solar (°)	Nascer (h:m)	Ocaso (h:m)	Comp. Dia (h:m)	Alt. Max. Sol (°)
1	-23,06	07:54	17:24	09:30	28,1	-17,31	07:43	17:56	10:13	34,1	-7,86	07:10	18:28	11:18	43,6
2	-22,98	07:54	17:25	09:31	28,2	-17,03	07:42	17:57	10:15	34,3	-7,48	07:09	18:29	11:20	43,9
3	-22,89	07:54	17:26	09:32	28,3	-16,74	07:41	17:58	10:17	34,6	-7,10	07:07	18:30	11:23	44,3
4	-22,79	07:54	17:26	09:32	28,4	-16,45	07:40	17:59	10:19	34,9	-6,71	07:06	18:31	11:25	44,7
5	-22,69	07:54	17:27	09:33	28,5	-16,15	07:39	18:01	10:22	35,2	-6,33	07:04	18:32	11:28	45,1
6	-22,58	07:54	17:28	09:34	28,6	-15,85	07:38	18:02	10:24	35,5	-5,94	07:03	18:33	11:30	45,5
7	-22,46	07:54	17:29	09:35	28,7	-15,54	07:37	18:03	10:26	35,9	-5,55	07:01	18:34	11:33	45,8
8	-22,33	07:54	17:30	09:36	28,9	-15,23	07:36	18:04	10:28	36,2	-5,16	07:00	18:35	11:35	46,2
9	-22,20	07:54	17:31	09:37	29,0	-14,91	07:35	18:05	10:30	36,5	-4,77	06:58	18:36	11:38	46,6
10	-22,06	07:54	17:32	09:38	29,2	-14,59	07:34	18:07	10:33	36,8	-4,38	06:57	18:37	11:40	47,0
11	-21,91	07:54	17:33	09:39	29,3	-14,27	07:33	18:08	10:35	37,1	-3,99	06:55	18:38	11:43	47,4
12	-21,76	07:53	17:34	09:41	29,5	-13,94	07:32	18:09	10:37	37,5	-3,59	06:54	18:39	11:45	47,8
13	-21,60	07:53	17:35	09:42	29,7	-13,61	07:31	18:10	10:39	37,8	-3,20	06:52	18:40	11:48	48,2
14	-21,43	07:53	17:36	09:43	29,8	-13,27	07:30	18:11	10:41	38,1	-2,80	06:51	18:41	11:50	48,6
15	-21,25	07:53	17:37	09:44	30,0	-12,93	07:28	18:12	10:44	38,5	-2,41	06:49	18:42	11:53	48,9
16	-21,07	07:52	17:38	09:46	30,2	-12,59	07:27	18:13	10:46	38,8	-2,01	06:48	18:43	11:55	49,3
17	-20,88	07:52	17:39	09:47	30,4	-12,24	07:26	18:15	10:49	39,2	-1,62	06:46	18:44	11:58	49,7
18	-20,69	07:52	17:40	09:48	30,6	-11,89	07:25	18:16	10:51	39,5	-1,22	06:45	18:45	12:00	50,1
19	-20,48	07:51	17:41	09:50	30,8	-11,54	07:24	18:17	10:53	39,9	-0,83	06:43	18:46	12:03	50,5
20	-20,28	07:51	17:42	09:51	31,0	-11,18	07:22	18:18	10:56	40,2	-0,43	06:41	18:47	12:06	50,9
21	-20,06	07:50	17:43	09:53	31,3	-10,82	07:21	18:19	10:58	40,6	-0,03	06:40	18:48	12:08	51,3
22	-19,84	07:50	17:44	09:54	31,5	-10,46	07:20	18:20	11:00	41,0	0,36	06:38	18:49	12:11	51,7
23	-19,61	07:49	17:46	09:57	31,7	-10,10	07:18	18:21	11:03	41,3	0,76	06:37	18:50	12:13	52,1
24	-19,38	07:48	17:47	09:59	32,0	-9,73	07:17	18:22	11:05	41,7	1,15	06:35	18:51	12:16	52,4
25	-19,14	07:48	17:48	10:00	32,2	-9,36	07:16	18:24	11:08	42,1	1,55	06:33	18:52	12:19	52,8
26	-18,90	07:47	17:49	10:02	32,4	-8,99	07:14	18:25	11:11	42,4	1,94	06:32	18:53	12:21	53,2
27	-18,65	07:46	17:50	10:04	32,7	-8,61	07:13	18:26	11:13	42,8	2,34	06:30	18:54	12:24	53,6
28	-18,39	07:46	17:51	10:05	33,0	-8,24	07:12	18:27	11:15	43,2	2,73	06:29	18:55	12:26	54,0
29	-18,13	07:45	17:52	10:07	33,2						3,12	06:27	18:56	12:29	54,4
30	-17,86	07:44	17:54	10:10	33,5						3,51	06:26	18:57	12:31	54,7
31	-17,59	07:43	17:55	10:12	33,8						3,90	06:24	18:58	12:34	55,1

Comparação de Métodos de Seguimento Solar para Sistemas Fotovoltaicos

DIA	Abril					Maio					Junho				
	Decl. Solar (°)	Nascer (h:m)	Ocaso (h:m)	Comp. Dia (h:m)	Alt. Max. Sol (°)	Decl. Solar (°)	Nascer (h:m)	Ocaso (h:m)	Comp. Dia (h:m)	Alt. Max. Sol (°)	Decl. Solar (°)	Nascer (h:m)	Ocaso (h:m)	Comp. Dia (h:m)	Alt. Max. do Sol (°)
1	4,29	06:22	18:59	12:37	55,5	14,89	05:39	19:27	13:48	65,6	21,98	05:13	19:54	14:41	72,4
2	4,67	06:21	18:59	12:38	55,9	15,20	05:38	19:28	13:50	65,9	22,12	05:13	19:55	14:42	72,6
3	5,06	06:19	19:00	12:41	56,2	15,50	05:37	19:29	13:52	66,2	22,25	05:12	19:55	14:43	72,7
4	5,44	06:18	19:01	12:43	56,6	15,79	05:36	19:30	13:54	66,5	22,37	05:12	19:56	14:44	72,8
5	5,83	06:16	19:02	12:46	57,0	16,08	05:35	19:31	13:56	66,7	22,49	05:12	19:57	14:45	72,9
6	6,21	06:15	19:03	12:48	57,3	16,37	05:33	19:32	13:59	67,0	22,60	05:11	19:57	14:46	73,1
7	6,58	06:13	19:04	12:51	57,7	16,65	05:32	19:33	14:01	67,3	22,71	05:11	19:58	14:47	73,2
8	6,96	06:12	19:05	12:53	58,1	16,93	05:31	19:33	14:02	67,5	22,80	05:11	19:58	14:47	73,3
9	7,34	06:10	19:06	12:56	58,4	17,20	05:30	19:34	14:04	67,8	22,89	05:11	19:59	14:48	73,4
10	7,71	06:08	19:07	12:59	58,8	17,47	05:29	19:35	14:06	68,1	22,98	05:11	20:00	14:49	73,5
11	8,08	06:07	19:08	13:01	59,1	17,73	05:28	19:36	14:08	68,3	23,06	05:11	20:00	14:49	73,5
12	8,45	06:05	19:09	13:04	59,5	17,99	05:27	19:37	14:10	68,6	23,13	05:10	20:01	14:51	73,6
13	8,81	06:04	19:10	13:06	59,8	18,24	05:26	19:38	14:12	68,8	23,19	05:10	20:01	14:51	73,7
14	9,18	06:02	19:11	13:09	60,2	18,49	05:25	19:39	14:14	69,0	23,25	05:10	20:01	14:51	73,8
15	9,54	06:01	19:12	13:11	60,5	18,73	05:24	19:40	14:16	69,3	23,30	05:10	20:02	14:52	73,8
16	9,90	06:00	19:13	13:13	60,9	18,97	05:23	19:41	14:18	69,5	23,34	05:10	20:02	14:52	73,9
17	10,25	05:58	19:14	13:16	61,2	19,20	05:23	19:42	14:19	69,7	23,38	05:10	20:03	14:53	73,9
18	10,61	05:57	19:15	13:18	61,6	19,43	05:22	19:43	14:21	69,9	23,40	05:11	20:03	14:52	73,9
19	10,96	05:55	19:15	13:20	61,9	19,65	05:21	19:44	14:23	70,1	23,43	05:11	20:03	14:52	74,0
20	11,30	05:54	19:16	13:22	62,2	19,86	05:20	19:44	14:24	70,3	23,44	05:11	20:04	14:53	74,0
21	11,65	05:52	19:17	13:25	62,5	20,07	05:19	19:45	14:26	70,6	23,45	05:11	20:04	14:53	74,0
22	11,99	05:51	19:18	13:27	62,9	20,28	05:19	19:46	14:27	70,7	23,45	05:11	20:04	14:53	74,0
23	12,32	05:50	19:19	13:29	63,2	20,47	05:18	19:47	14:29	70,9	23,45	05:11	20:04	14:53	74,0
24	12,66	05:48	19:20	13:32	63,5	20,67	05:17	19:48	14:31	71,1	23,44	05:12	20:04	14:52	74,0
25	12,99	05:47	19:21	13:34	63,8	20,85	05:17	19:49	14:32	71,3	23,42	05:12	20:05	14:53	74,0
26	13,32	05:46	19:22	13:36	64,1	21,03	05:16	19:49	14:33	71,5	23,39	05:12	20:05	14:53	74,0
27	13,64	05:44	19:23	13:39	64,4	21,21	05:16	19:50	14:34	71,7	23,36	05:13	20:05	14:52	74,0
28	13,96	05:43	19:24	13:41	64,7	21,37	05:15	19:51	14:36	71,8	23,32	05:13	20:05	14:52	74,0
29	14,27	05:42	19:25	13:43	65,0	21,54	05:14	19:52	14:38	72,0	23,27	05:13	20:05	14:52	73,9
30	14,59	05:41	19:26	13:45	65,3	21,69	05:14	19:53	14:39	72,1	23,22	05:14	20:05	14:51	73,9
31						21,84	05:14	19:53	14:39	72,3					

Comparação de Métodos de Seguimento Solar para Sistemas Fotovoltaicos

DIA	Julho					Agosto					Setembro				
	Decli. Solar (°)	Nascer (h:m)	Ocaso (h:m)	Comp. Dia (h:m)	Alt. Max. Sol (°)	Decli. Solar (°)	Nascer (h:m)	Ocaso (h:m)	Comp. Dia (h:m)	Alt. Max. Sol (°)	Decli. Solar (°)	Nascer (h:m)	Ocaso (h:m)	Comp. Dia (h:m)	Alt. Max. do Sol (°)
1	23,16	05:14	20:05	14:51	73,8	18,15	05:37	19:48	14:11	69,0	8,44	06:05	19:08	13:03	59,1
2	23,09	05:15	20:05	14:50	73,8	17,90	05:38	19:47	14:09	68,7	8,07	06:06	19:07	13:01	58,7
3	23,02	05:15	20:05	14:50	73,7	17,64	05:39	19:46	14:07	68,4	7,71	06:07	19:05	12:58	58,3
4	22,94	05:16	20:04	14:48	73,6	17,38	05:40	19:45	14:05	68,2	7,34	06:07	19:04	12:57	57,9
5	22,85	05:16	20:04	14:48	73,6	17,11	05:41	19:44	14:03	67,9	6,97	06:08	19:02	12:54	57,6
6	22,76	05:17	20:04	14:47	73,5	16,84	05:41	19:43	14:02	67,6	6,60	06:09	19:00	12:51	57,2
7	22,66	05:18	20:04	14:46	73,4	16,56	05:42	19:42	14:00	67,4	6,22	06:10	18:59	12:49	56,8
8	22,55	05:18	20:04	14:46	73,3	16,28	05:43	19:41	13:58	67,1	5,85	06:11	18:57	12:46	56,4
9	22,44	05:19	20:03	14:44	73,2	16,00	05:44	19:40	13:56	66,8	5,47	06:12	18:56	12:44	56,0
10	22,32	05:19	20:03	14:44	73,1	15,71	05:45	19:38	13:53	66,5	5,09	06:13	18:54	12:41	55,6
11	22,19	05:20	20:03	14:43	72,9	15,42	05:46	19:37	13:51	66,2	4,71	06:14	18:52	12:38	55,2
12	22,06	05:21	20:02	14:41	72,8	15,12	05:47	19:36	13:49	65,9	4,33	06:14	18:51	12:37	54,9
13	21,92	05:21	20:02	14:41	72,7	14,82	05:48	19:35	13:47	65,6	3,95	06:15	18:49	12:34	54,5
14	21,77	05:22	20:01	14:39	72,5	14,51	05:49	19:34	13:45	65,3	3,57	06:16	18:48	12:32	54,1
15	21,62	05:23	20:01	14:38	72,4	14,20	05:50	19:32	13:42	65,0	3,18	06:17	18:46	12:29	53,7
16	21,46	05:24	20:00	14:36	72,2	13,89	05:51	19:31	13:40	64,6	2,80	06:18	18:44	12:26	53,3
17	21,30	05:24	20:00	14:36	72,1	13,57	05:51	19:30	13:39	64,3	2,41	06:19	18:43	12:24	52,9
18	21,13	05:25	19:59	14:34	71,9	13,25	05:52	19:28	13:36	64,0	2,02	06:20	18:41	12:21	52,5
19	20,95	05:26	19:59	14:33	71,7	12,93	05:53	19:27	13:34	63,7	1,63	06:20	18:39	12:19	52,1
20	20,77	05:27	19:58	14:31	71,6	12,60	05:54	19:26	13:32	63,3	1,24	06:21	18:38	12:17	51,7
21	20,58	05:28	19:57	14:29	71,4	12,27	05:55	19:24	13:29	63,0	0,86	06:22	18:36	12:14	51,3
22	20,39	05:28	19:57	14:29	71,2	11,93	05:56	19:23	13:27	62,6	0,47	06:23	18:35	12:12	51,0
23	20,19	05:29	19:56	14:27	71,0	11,60	05:57	19:21	13:24	62,3	0,08	06:24	18:33	12:09	50,6
24	19,99	05:30	19:55	14:25	70,8	11,26	05:58	19:20	13:22	62,0	-0,32	06:25	18:31	12:06	50,2
25	19,77	05:31	19:54	14:23	70,6	10,91	05:59	19:19	13:20	61,6	-0,71	06:26	18:30	12:04	49,8
26	19,56	05:32	19:54	14:22	70,4	10,57	06:00	19:17	13:17	61,3	-1,10	06:27	18:28	12:01	49,5
27	19,34	05:33	19:53	14:20	70,1	10,22	06:00	19:16	13:16	60,9	-1,49	06:28	18:26	11:58	49,1
28	19,11	05:33	19:52	14:19	69,9	9,87	06:01	19:14	13:13	60,5	-1,88	06:28	18:25	11:57	48,7
29	18,88	05:34	19:51	14:17	69,7	9,51	06:02	19:13	13:11	60,2	-2,27	06:29	18:23	11:54	48,4
30	18,64	05:35	19:50	14:15	69,5	9,16	06:03	19:11	13:08	59,8	-2,66	06:30	18:22	11:52	48,0
31	18,40	05:36	19:49	14:13	69,2	8,80	06:04	19:10	13:06	59,4					

Comparação de Métodos de Seguimento Solar para Sistemas Fotovoltaicos

DIA	Outubro					Novembro					Dezembro				
	Decl. Solar (°)	Nascer (h:m)	Ocaso (h:m)	Comp. Dia (h:m)	Alt. Max. Sol (°)	Decl. Solar (°)	Nascer (h:m)	Ocaso (h:m)	Comp. Dia (h:m)	Alt. Max. Sol (°)	Decl. Solar (°)	Nascer (h:m)	Ocaso (h:m)	Comp. Dia (h:m)	Alt. Max. Sol (°)
1	-3,05	06:31	18:20	11:49	47,6	-14,34	07:03	17:37	10:34	36,6	-21,76	07:35	17:16	09:41	29,1
2	-3,44	06:32	18:19	11:47	47,2	-14,66	07:04	17:36	10:32	36,2	-21,91	07:36	17:15	09:39	29,0
3	-3,82	06:33	18:17	11:44	46,9	-14,98	07:05	17:35	10:30	35,9	-22,06	07:37	17:15	09:38	28,8
4	-4,21	06:34	18:15	11:41	46,5	-15,29	07:06	17:34	10:28	35,6	-22,20	07:38	17:15	09:37	28,7
5	-4,60	06:35	18:14	11:39	46,1	-15,60	07:07	17:33	10:26	35,3	-22,33	07:39	17:15	09:36	28,5
6	-4,98	06:36	18:12	11:36	45,7	-15,90	07:08	17:32	10:24	35,0	-22,46	07:40	17:15	09:35	28,4
7	-5,37	06:37	18:11	11:34	45,4	-16,20	07:09	17:31	10:22	34,7	-22,58	07:41	17:15	09:34	28,3
8	-5,75	06:38	18:09	11:31	45,0	-16,50	07:10	17:30	10:20	34,4	-22,69	07:42	17:15	09:33	28,2
9	-6,14	06:39	18:08	11:29	44,6	-16,79	07:12	17:29	10:17	34,1	-22,79	07:42	17:15	09:33	28,1
10	-6,52	06:40	18:06	11:26	44,2	-17,07	07:13	17:28	10:15	33,8	-22,89	07:43	17:15	09:32	27,9
11	-6,90	06:41	18:05	11:24	43,9	-17,35	07:14	17:27	10:13	33,6	-22,97	07:44	17:15	09:31	27,9
12	-7,27	06:42	18:03	11:21	43,5	-17,63	07:15	17:26	10:11	33,3	-23,06	07:45	17:15	09:30	27,8
13	-7,65	06:43	18:02	11:19	43,1	-17,90	07:16	17:25	10:09	33,0	-23,13	07:46	17:15	09:29	27,7
14	-8,03	06:44	18:00	11:16	42,8	-18,16	07:17	17:24	10:07	32,8	-23,20	07:46	17:15	09:29	27,7
15	-8,40	06:45	17:59	11:14	42,4	-18,42	07:18	17:24	10:06	32,5	-23,25	07:47	17:15	09:28	27,6
16	-8,77	06:46	17:57	11:11	42,0	-18,67	07:19	17:23	10:04	32,2	-23,31	07:48	17:16	09:28	27,6
17	-9,14	06:47	17:56	11:09	41,7	-18,92	07:21	17:22	10:01	32,0	-23,35	07:48	17:16	09:28	27,6
18	-9,51	06:48	17:55	11:07	41,3	-19,16	07:22	17:21	09:59	31,8	-23,38	07:49	17:16	09:27	27,6
19	-9,87	06:49	17:53	11:04	41,0	-19,40	07:23	17:21	09:58	31,5	-23,41	07:49	17:17	09:28	27,5
20	-10,23	06:50	17:52	11:02	40,6	-19,63	07:24	17:20	09:56	31,3	-23,43	07:50	17:17	09:27	27,5
21	-10,59	06:51	17:50	10:59	40,3	-19,86	07:25	17:20	09:55	31,1	-23,45	07:50	17:17	09:27	27,5
22	-10,95	06:52	17:49	10:57	39,9	-20,08	07:26	17:19	09:53	30,8	-23,45	07:51	17:18	09:27	27,5
23	-11,30	06:53	17:48	10:55	39,6	-20,29	07:27	17:19	09:52	30,6	-23,45	07:51	17:18	09:27	27,6
24	-11,65	06:54	17:47	10:53	39,2	-20,50	07:28	17:18	09:50	30,4	-23,44	07:52	17:19	09:27	27,6
25	-12,00	06:55	17:45	10:50	38,9	-20,70	07:29	17:18	09:49	30,2	-23,42	07:52	17:19	09:27	27,6
26	-12,35	06:56	17:44	10:48	38,5	-20,89	07:30	17:17	09:47	30,0	-23,39	07:53	17:20	09:27	27,7
27	-12,69	06:57	17:43	10:46	38,2	-21,08	07:31	17:17	09:46	29,8	-23,36	07:53	17:21	09:28	27,7
28	-13,03	06:58	17:42	10:44	37,9	-21,26	07:32	17:16	09:44	29,6	-23,32	07:53	17:21	09:28	27,8
29	-13,36	06:59	17:40	10:41	37,5	-21,43	07:33	17:16	09:43	29,5	-23,27	07:53	17:22	09:29	27,8
30	-13,69	07:00	17:39	10:39	37,2	-21,60	07:34	17:16	09:42	29,3	-23,21	07:54	17:23	09:29	27,9
31	-14,02	07:01	17:38	10:37	36,9						-23,15	07:54	17:23	09:29	28,0