



Universidade de Coimbra
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Matemática

Dissertação de Mestrado em Engenharia Geográfica
2011/2012

**Avaliação do Potencial Energético Solar das Coberturas dos
Edifícios da Cidade de Coimbra: Um Estudo Comparativo.**

*Assessment of the Potential of Solar Energy of Coimbra's Rooftops:
A Comparative Study.*

Pedro Gonçalo Guerra Poseiro

Orientador: Gil Gonçalves
Co-Orientador: Cidália Fonte

Coimbra, 2012

Agradecimentos

A realização desta dissertação marca o fim de uma importante etapa da minha vida. Agradeço a todos aqueles que me apoiaram e contribuíram para que conseguisse fazer este trabalho.

Muito especialmente, quero agradecer à minha mãe que é parte de mim e que me deu sempre mais do que podia, não só neste trabalho, mas em tudo na minha vida.

Ao Professor Gil Gonçalves que mostrou uma disponibilidade, interesse e apoio inigualáveis.

À Professora Cidália Fonte que de forma muito complementar me ajudou neste trabalho.

Aos melhores amigos.

Resumo

O Sol é a principal fonte de energia da Terra e é um recurso inesgotável, constante e limpo. A grande concentração de pessoas nos centros urbanos e o aumento das atividades económicas desencadeou um aumento das necessidades energéticas e a energia solar têm aparecido como uma alternativa interessante para responder a essas necessidades, à medida que a sua acessibilidade e potencialidade são cada vez maiores. Portugal é um dos países da Europa com maior potencial solar. Para estudar o potencial energético solar urbano, os modelos matemáticos são uma ferramenta eficiente e económica para simular a variação espaço-temporal da radiação solar, porque podem integrar dados com alta resolução espacial e estão capacitados para representar a complexa morfologia urbana. Vários modelos já foram desenvolvidos, tal como o *Solar Analyst*, o *R.Sun* e o *Shortwave*. Contudo, foram pouco estudados no cenário urbano. O objectivo deste trabalho passou por compará-los a fim de definir qual o modelo mais confiável e que melhor se adapte às condições da cidade de Coimbra. Entre os modelos considerados, o *R.Sun* revelou ser o modelo mais “competente” pelo que foi o escolhido para estudar o potencial energético solar em Coimbra. A sua escolha foi feita com base na comparação dos valores de radiação solar obtidos pelo modelo e os fornecidos pela Estação Meteorológica de Coimbra e pelo PVGIS. Por fim pretende-se obter o mapa do potencial energético solar para as coberturas de alguns edifícios da Universidade de Coimbra.

Abstract

The Sun is the most important energy source of the Earth and an inexhaustible, constant and clean source. The heavy concentration of population and increasing economic activities have been looking at this kind of energy as an interesting alternative as it becomes more accessible with less costs and higher performance. Portugal is one of the countries with the highest solar potential in Europe. The potential of solar energy at urban scale can be simulated with mathematical models in an economical and efficient way, modelling the solar radiation received at the Earth's surface that varies over the time and space. They can integrate high spatial resolution LIDAR data and represent a complex urban morphology. Numerous solar radiation models like *Solar Analyst*, *R.Sun* and *Shortwave* have already been developed. However, these models have not yet been tested much in urban environment. The aim of this research is to define which of these models are the best to represent the solar radiation in Coimbra's urban environment. The *R.Sun* model has been the best one, showing the best results and being the most complete model when compared with data provided by the Meteorological Station of Coimbra and PVGIS. The propose of this project is to realize the solar energy potential map of Coimbra's rooftops.

Índice

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Índice.....	vi
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tabelas.....	x
Simbologia.....	xi
Siglas.....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Aproveitamento da energia solar.....	1
1.1.1 Formas de captação.....	1
1.1.2 Vantagens e desvantagens.....	2
1.1.3 Painéis fotovoltaicos.....	3
1.1.4 Sistema básico PV.....	5
1.2 Panorama da utilização da energia solar.....	6
1.2.1 Na Europa e no mundo.....	6
1.2.2 Em Portugal.....	9
1.3 A radiação solar.....	13
1.3.1 A variação espaço-temporal.....	14
1.3.2 Fatores que influenciam a radiação solar até à superfície terrestre.....	15
1.3.3 A relevância do modelo matemático.....	15
1.3.4 Contexto urbano.....	16
1.4 Estações meteorológicas e satélites.....	16
1.4.1 ESRA.....	17
1.4.2 PVGIS.....	18
1.4.3 Avaliação da precisão dos dados da ESRA e do PVGIS.....	19
1.4.4 Factor de <i>Linke</i>	20
1.5 Objetivos.....	20
1.5.1 Objetivos gerais.....	20
1.5.2 Objetivos específicos.....	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 Modelação da radiação solar.....	22
2.1.1 Constante solar.....	22
2.1.2 Excentricidade da órbita.....	22
2.1.3 Radiação extraterrestre.....	23
2.1.4 Ângulo de elevação e ângulo azimutal solar.....	24
2.1.5 Declinação solar.....	24
2.1.6 Ângulo horário.....	24
2.1.7 Ângulo de incidência solar.....	25
2.1.8 Declive e orientação.....	25
2.1.9 Massa de ar.....	26
2.1.10 Transmitância atmosférica.....	27
2.1.11 Radiação direta.....	28
2.1.12 Radiação difusa.....	29
2.1.13 Radiação refletida.....	29
2.1.14 Nebulosidade.....	30
2.1.15 Sombras.....	30
2.2 Modelos de radiação solar.....	31
2.2.1 Shortwave.....	31
2.2.1.1 Radiação direta.....	32
2.2.1.2 Radiação difusa.....	34
2.2.1.3 Radiação refletida.....	34
2.2.2 Solar Analyst.....	34
2.2.2.1 Radiação direta.....	36

2.2.2.2	Radiação difusa.....	36
2.2.3	R.Sun.....	37
2.2.3.1	Radiação direta.....	38
2.2.3.2	Radiação difusa.....	39
2.2.3.3	Radiação refletida.....	41
2.2.4	Características gerais dos modelos.....	42
3	METODOLOGIA.....	43
3.1	Análise analítica dos modelos.....	43
3.2	Avaliação comparativa dos modelos.....	43
3.2.1	Conversão de unidades.....	44
3.2.2	Radiação direta.....	44
3.2.3	Radiação difusa.....	45
3.2.4	Radiação refletida.....	45
3.3	Comparação dos modelos com os dados da estação meteorológica.....	45
3.3.1	Conversão de unidades.....	45
3.3.2	Radiação direta.....	46
3.3.3	Radiação difusa.....	47
3.4	Análise dos dados fornecidos pelo PVGIS.....	47
3.4.1	Comparação com os dados da estação meteorológica.....	47
3.4.2	Variação da radiação solar para diferentes inclinações.....	47
3.5	Parametização do <i>Clear-sky index</i> para a cidade de Coimbra.....	48
3.6	Cálculo e análise comparativa da radiação solar para um edifício.....	49
3.6.1	Radiação direta.....	49
3.6.2	Radiação difusa.....	50
3.6.3	Radiação refletida.....	50
3.6.4	Radiação global.....	50
3.7	Mapa de radiação solar da cidade de Coimbra.....	50
3.8	Mapa do potencial energético das coberturas dos edifícios de Coimbra.....	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4.1	Análise analítica dos modelos.....	55
4.2	Avaliação comparativa dos modelos.....	58
4.2.1	Radiação direta.....	58
4.2.2	Radiação difusa.....	59
4.3	Comparação dos modelos com os dados da estação meteorológica.....	61
4.3.1	Radiação direta.....	61
4.3.2	Radiação difusa.....	64
4.4	Análise dos dados fornecidos pelo PVGIS.....	65
4.4.1	Comparação com os dados da estação meteorológica.....	65
4.4.2	Variação da radiação solar para diferentes inclinações.....	65
4.5	Parametização do <i>Clear-sky index</i> para a cidade de Coimbra.....	67
4.5.1	Dados da estação meteorológica.....	67
4.5.1.1	Radiação direta.....	67
4.5.1.2	Radiação difusa.....	70
4.5.2	Dados do PVGIS.....	71
4.5.2.1	Radiação direta.....	71
4.5.2.2	Radiação difusa.....	73
4.6	Cálculo e análise comparativa da radiação solar para um edifício.....	74
4.6.1	Radiação direta.....	74
4.6.2	Radiação difusa.....	76
4.6.3	Radiação refletida.....	78
4.6.4	Radiação global.....	79
4.7	Aplicação de um modelo à cidade de Coimbra.....	81
4.7.1	Mapa de radiação solar.....	81
4.7.2	Mapa das áreas reais.....	83
4.7.3	Mapa do potencial energético solar.....	84
5	CONCLUSÕES.....	86
6	BIBLIOGRAFIA.....	90
	ANEXO A – Dados climatológicos do período de 1961-1990 da estação meteorológica de Coimbra, excepto os dados de nebulosidade que são do período de 1971-2000.....	93
	ANEXO B – Valores mensais de radiação solar na estação meteorológica de Coimbra obtidos pelo PVGIS.....	94
	ANEXO C – Mapas de radiação direta e difusa de um edifício e área envolvente obtidos pelo <i>Shortwave</i>	95
	ANEXO D – Mapas de radiação direta e difusa de um edifício e área envolvente obtidos pelo <i>Solar Analyst</i>	96
	ANEXO E – Mapas de radiação direta e difusa de um edifício e área envolvente obtidos pelo <i>R.Sun</i>	97

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Painéis fotovoltaicos	3
Figura 1.2 - Evolução da eficiência das células fotovoltaicas	4
Figura 1.3 - Sistema básico PV.....	5
Figura 1.4 - Capacidade mundial de PV, 1995–2011.....	6
Figura 1.5 – Capacidade mundial de PV, Top 10 Países, 2011.....	8
Figura 1.6 – Mapa de radiação solar para a Europa.....	8
Figura 1.7 – Quota de eletricidade gerada por cada tecnologia em relação ao consumo total de eletricidade em Portugal (2010-2020).....	9
Figura 1.8 - Central Fotovoltaica de Hércules.....	10
Figura 1.9 - Central Fotovoltaica da Amareleja.....	10
Figura 1.10 - Parque Urbano do Mercado Abastecedor da Região de Lisboa	11
Figura 1.11 – Radiação solar antes e depois de atravessar a atmosfera	13
Figura 1.12 – Percurso das diferentes componentes da radiação solar	14
Figura 1.13 - EMQ (Erro médio quadrático) no PV-GIS e no mapa ESRA	19
Figura 2.1 – Curva da distribuição da radiação espectral do Sol	22
Figura 2.2 – Esquema da distância Terra-Sol ao longo do ano	23
Figura 2.3 – Variação da radiação extraterrestre ao longo do ano	23
Figura 2.4 –Variação do ângulo horário.....	24
Figura 2.5 – Variação da massa de ar.....	27
Figura 2.6 – Comparação da incidência normal do espectro solar ao nível das águas do mar num dia de céu limpo (curva continua) com a radiação extraterrestre (curva a tracejado).....	28
Figura 2.7 - Levantamento das obstruções para criar a vista hemisférica	31
Figura 2.8 – Diagrama do Modelo de Radiação.....	33
Figura 2.9 - <i>Overlay</i> do Sunmap com a vista hemisférica.....	35
Figura 2.10 - <i>Overlay</i> do Skymap com a vista hemisférica	35
Figura 3.1 - Edifício localizado no lugar da estação meteorológica de Coimbra	49
Figura 3.2 – MDS da Cidade de Coimbra (3D).....	51
Figura 3.3 – Edifícios da Universidade de Coimbra e o MDS da área envolvente (2D)	51
Figura 3.4 - Diagrama para obtenção do mapa de potencial energético solar.....	53
Figura 4.1– Variação da massa de ar em função da elevação solar	55
Figura 4.2 – Diferença entre a transmitância atmosférica calculada pelos <i>Shortwave</i> e o <i>Solar Analyst</i>	56
Figura 4.3 - Diferença entre a transmitância atmosférica calculada pelo <i>Shortwave</i> e o <i>R.Sun</i>	57
Figura 4.4 – Transmitância atmosférica com os parâmetros específicos definidos.....	57
Figura 4.5 - Radiação direta com os parâmetros específicos definidos	58
Figura 4.6 – Radiação direta obtida com a alteração de $\tau = 0,75$ para o <i>Solar Analyst</i>	59
Figura 4.7 – Radiação difusa obtida pelos modelos.....	60
Figura 4.8 – Comparação da radiação direta obtida pelo <i>Shortwave</i> e a estação meteorológica.....	61
Figura 4.9 – Comparação da radiação direta obtida pelo <i>Solar Analyst</i> e a estação meteorológica.....	62
Figura 4.10 – Comparação da radiação direta obtida pelo <i>R.Sun</i> e a estação meteorológica	63
Figura 4.11 – Comparação da radiação difusa obtida pelos modelos e a estação meteorológica.....	64
Figura 4.12 - Comparação da radiação direta, difusa e global entre o PVGIS e a estação meteorológica para uma superfície horizontal.....	65
Figura 4.13 – Variação da radiação direta obtida pelos PVGIS para diferentes inclinações.....	66
Figura 4.14 - Variação da radiação difusa obtida pelo PVGIS para diferentes inclinações.....	66
Figura 4.15 – <i>Clear-sky index</i> da radiação direta para o <i>Shortwave</i> , <i>Solar Analyst</i> e <i>R.Sun</i> obtido através da estação meteorológica; Curva D/G da estação meteorológica	68
Figura 4.16 – Correlação entre o <i>Clear-sky index</i> da radiação direta para o <i>R.Sun</i> com $T_{LK} = 2,5$ e o D/G da estação meteorológica.....	68
Figura 4.17 – <i>Clear-sky index</i> da radiação direta para o <i>R.Sun</i> com T_{LK} variável; curva D/G da estação meteorológica.....	69
Figura 4.18 – Correlação entre o <i>Clear-sky index</i> da radiação direta para o <i>R.Sun</i> com T_{LK} variável e o D/G da estação meteorológica.....	69
Figura 4.19 – <i>Clear-sky index</i> da radiação difusa para o <i>Shortwave</i> , <i>Solar Analyst</i> e <i>R.Sun</i> obtido através da estação meteorológica.....	70

Figura 4.20 – <i>Clear-sky index</i> da radiação direta para o <i>Shortwave</i> , <i>Solar Analyst</i> e <i>R.Sun</i> obtido através do PVGIS; Curva D/G do PVGIS.....	71
Figura 4.21 – Correlação entre o <i>Clear-sky index</i> da radiação direta para o <i>R.Sun</i> com T_{LK} variável e o D/G do PVGIS.....	72
Figura 4.22 – Correlação entre o <i>Clear-sky index</i> da radiação direta para o <i>Shortwave</i> e o D/G do PVGIS.....	72
Figura 4.23 – Correlação entre o <i>Clear-sky index</i> da radiação direta para o <i>Solar Analyst</i> e o D/G do PVGIS.....	73
Figura 4.24 – <i>Clear-sky index</i> da radiação difusa para o <i>Shortwave</i> , <i>Solar Analyst</i> e <i>R.Sun</i> obtido através do PVGIS..	73

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 – Quantidade PV instalada acumulada na Europa (MW) 2005-2011	7
Tabela 1.2 - Tarifa de venda à rede em 2012 (€/kWh produzidos)	12
Tabela 1.3 – Características do regime bonificado e do regime geral	12
Tabela 2.1 – Valores de <i>Albedo</i> para diferentes tipos de superfícies	29
Tabela 2.2 – Características gerais dos modelos	42
Tabela 3.1 - Valores da nebulosidade e <i>Clear-sky index</i> médios (1971-2000).....	46
Tabela 3.2 - Valores de T_{LK} para Coimbra.....	46
Tabela 4.1 – Radiação refletida para um ano	79

Simbologia

S_0 – Constante solar

λ – Comprimento de onda

N – Número do dia

R_0 – Radiação extraterrestre

ε – Excentricidade orbital

ϕ – Latitude do lugar

δ – Declinação solar

α – Ângulo de elevação solar

β – Ângulo azimutal solar

δ – Declinação solar

h – Ângulo horário

h_{ns} – Ângulo horário ao nascer do sol

h_{ps} – Ângulo horário ao pôr do sol

S – Declive do terreno (*Slope*)

A – Orientação do terreno (*Aspect*)

M – Massa de ar

τ_d – Transmitância atmosférica

T_{LK} – Factor de *Linke*

\AA – Coeficiente de *Angstrom*

R_d – Radiação direta

τ_f (ou p) – Factor de transmitância da radiação difusa

r – *Albedo*

k_c – *Clear-sky index*

R_f – Radiação difusa

$S_R(M)$ – Dispersão de *Rayleigh* para o *R.Sun*

R_r – Radiação refletida

R_g – Radiação global

ψ – Peso

$\frac{D}{G}$ – Quantidade da radiação global que é difusa

Siglas

PV - *Photovoltaics*, Em engenharia: Tecnologia de converter energia solar em energia elétrica diretamente;

SIG – Sistema de Informação Geográfica;

MDS – Modelo Digital de Superfície;

MDT – Modelo Digital de Terreno;

ESRA – *European Solar Radiation Atlas*;

PVGIS – *Photovoltaic Geographical Information System*;

EMQ – Erro Médio Quadrático.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Aproveitamento da energia solar

O Sol é a principal fonte de energia da Terra, representando 99.8% do total de energia existente (Kumar, 1997). É responsável pela manutenção das várias formas de vida existentes e trata-se de um recurso praticamente inesgotável e constante, quando comparado com a nossa escala de existência no planeta. A energia solar é uma alternativa válida para satisfazer as necessidades futuras do planeta, demasiado dependente de fontes de energia em declínio acentuado, como os combustíveis fósseis e a energia nuclear. Segundo Almeida (2005), o esforço financeiro feito durante algumas décadas por diversas potências no desenvolvimento da energia nuclear, se tivesse sido direcionado para a energia solar, estaríamos hoje quase autossuficientes em termos de geração de energia elétrica.

1.1.1 Formas de captação

A energia solar pode ser captada para a produção de energia elétrica ou energia térmica. Os métodos de captura da energia solar classificam-se em diretos ou indiretos:

- **Direto** - significa que há apenas uma transformação para fazer da energia solar um tipo de energia utilizável pelo homem. Exemplos:
 - A energia solar atinge uma célula fotovoltaica criando eletricidade. A conversão a partir de células fotovoltaicas é classificada como direta, apesar de que a energia elétrica gerada precisará de nova conversão - em energia luminosa ou mecânica, por exemplo - para se fazer útil.
 - A energia solar atinge uma superfície escura e é transformada em calor, que aquecerá uma quantidade de água, por exemplo - esse princípio é muito utilizado em aquecedores solares.
- **Indireto** - significa que precisará de haver mais do que uma transformação para que surja energia utilizável. Esta forma de captação é utilizada quando a energia captada não é diretamente utilizada, mas sim concentrada ou armazenada antes de ser utilizada, muitas vezes sob a forma de calor antes de ser convertida para eletricidade. A central de energia solar PS10¹, localizada em Sevilha, Espanha, é

¹ http://en.wikipedia.org/wiki/PS10_solar_power_plant

um exemplo de uma central que concentra a energia solar.

Também se classificam em passivos e ativos:

- **Sistemas passivos** - são geralmente diretos e dizem respeito ao aproveitamento da iluminação natural e do calor para aquecimento de ambientes nos edifícios. Desta forma, reduzem-se as necessidade de iluminação e aquecimento a partir de outras fontes de energia.
- **Sistemas ativos** - são sistemas que apelam ao auxílio de dispositivos elétricos, mecânicos ou químicos para aumentar o rendimento da recolha. Sistemas indiretos são quase sempre também ativos.

1.1.2 Vantagens e desvantagens

O seu aproveitamento apresenta inúmeras vantagens. Algumas das quais começam a tomar cada vez maior importância. Destacam-se:

- O Sol ser um recurso inesgotável e constante;
- Não poluir;
- Os painéis serem cada vez mais potentes;
- Ser cada vez mais economicamente viável (investimento viável, preços mais baixos, políticas de incentivo por parte dos governos, ...);
- As centrais necessitarem de manutenção mínima;
- Ser um recurso distribuído equitativamente, logo encontrar-se disponível em locais onde não existem outras fontes de energia, dispensando investimentos em linhas de transmissão.

Entre as desvantagens, destacam-se:

- A necessidade de grandes superfícies de captação para o seu aproveitamento;
- Um painel solar consumir uma quantidade enorme de energia para ser fabricado;
- As formas de armazenamento da energia solar serem ainda pouco eficientes quando comparadas, por exemplo, aos combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), a energia hidroelétrica (água) e a biomassa (bagaço da cana ou bagaço da laranja), uma vez que as baterias de armazenamento ainda não são um investimento viável;

- Locais em latitudes médias e altas que sofrem quedas bruscas de produção durante os meses de inverno devido à menor disponibilidade diária de energia solar, bem como locais com frequente cobertura de nuvens (Ex.: Curitiba, Londres).

Face à ineficiência do armazenamento da energia solar em baterias, em Portugal, à semelhança de outros países no mundo, desde Abril de 2008, qualquer indivíduo pode produzir e vender a energia elétrica solar gerada à rede elétrica nacional.

1.1.3 Painéis fotovoltaicos

Os painéis solares fotovoltaicos são os dispositivos utilizados para converter a energia da luz do Sol em energia elétrica. Os painéis são compostos por células solares, assim designadas já que captam a luz do Sol (Fig. 1.1).

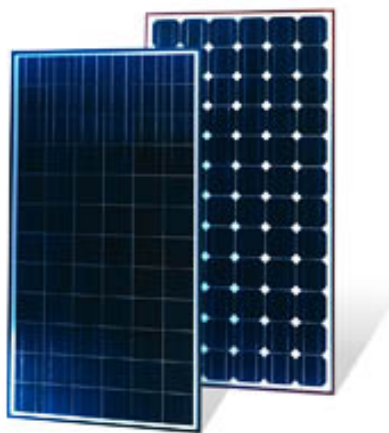


Figura 1.1 - Painéis fotovoltaicos

Tradicionalmente, o material usado em células solares ou fotovoltaicas é o Silício (Si). O Silício não existe na natureza na forma pura, mas sim na forma de Sílica ou Dióxido de Silício. O Quartzito pode conter 99% de Silício. Outros materiais que também possuem Silício na sua constituição, tais como as areias, não são bons materiais devido à quantidade elevada de impurezas e ao facto da purificação ser um processo demasiado caro e difícil de realizar. A performance do Silício também não é impressionante para além de se degradar com a idade. Para recolher todo o espectro da luz solar é preciso demasiado Silício. Isto resulta da física do Silício que é um mau absorvente de luz. Para absorver todo o espectro solar, a célula de Silício deveria ter no mínimo 2 milímetros de

espessura. Como o custo seria proibitivo, são usadas espessuras inferiores, o que significa uma quantidade menor de luz absorvida. Para minimizar esta perda, dopa-se² o Silício de forma a capturar as radiações mais energéticas (os comprimentos de onda entre 0.028 μm e 0,5 μm). No entanto, e além de todas estas contingências, o Silício continuou a ser o material mais utilizado até à pouco tempo, apesar dos elevados custos da sua transformação e de ser uma tarefa suja e tecnologicamente complexa. Na área dos novos materiais, os desenvolvimentos têm sido constantes. Prova disso é o facto dos grandes fabricantes de células fotovoltaicas estarem a abandonar o Silício e a entrar no negócio dos novos materiais com taxas de eficiência cada vez maiores. Os materiais mais promissores, em termos de custos e eficiência, são o Disseleneto de Índio e Cobre (Cu(In,Ga)Se_2) e o Telureto de Cádmio (CdTe). A Figura 1.2 mostra a evolução da eficiência das células fotovoltaicas entre 1975 e 2012 em função dos materiais utilizados.

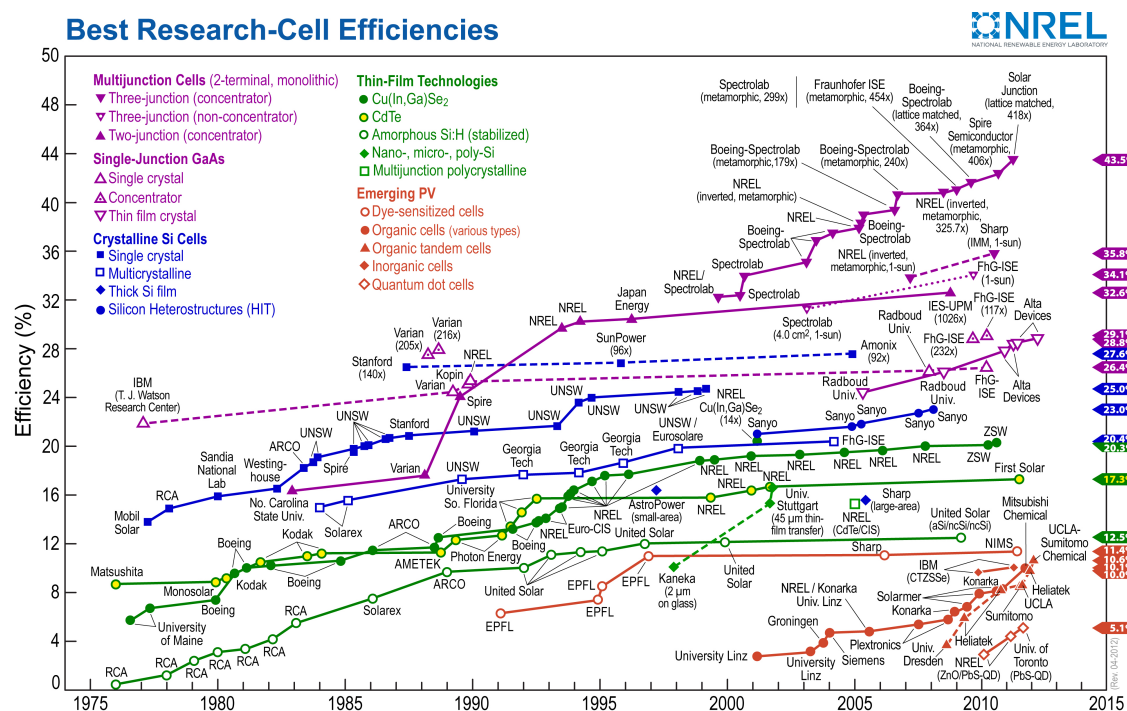


Figura 1.2 - Evolução da eficiência das células fotovoltaicas
 Fonte: National Renewable Energy Laboratory

De acordo com a Figura 1.2, as linhas azuis dizem respeito aos resultados com utilização do Silício, onde se tem deixado recentemente de investir pelas razões já justificadas. As linhas verdes representam os materiais onde têm começado a ser feitos mais

² É a adição de impurezas químicas elementares (como o índio ou o fósforo) em elementos químicos semicondutores, como o silício, com a finalidade de dotá-los de propriedades de semi-condução controlada e específica.

investimentos que apesar de apresentarem uma eficiência ligeiramente inferior à do Silício apresentam um custo-benefício maior. Por outro lado, novas formas de concentrar a energia solar têm surgido fazendo com que a taxa de eficiência chegue a ultrapassar os 30%, nomeadamente através da utilização de células de Arseniato de Gálio (GaAs), no entanto, ainda não são suficientemente competitivas por causa dos elevados custos (linhas roxas). O longo período em que se construíram painéis de Silício faz com que nos dias de hoje a maioria dos painéis instalados sejam deste material. O rendimento médio das células fotovoltaicas de Silício ronda os 12%.

1.1.4 Sistema básico PV

O esquema seguinte mostra como funciona um sistema simples PV (Fig. 1.3):

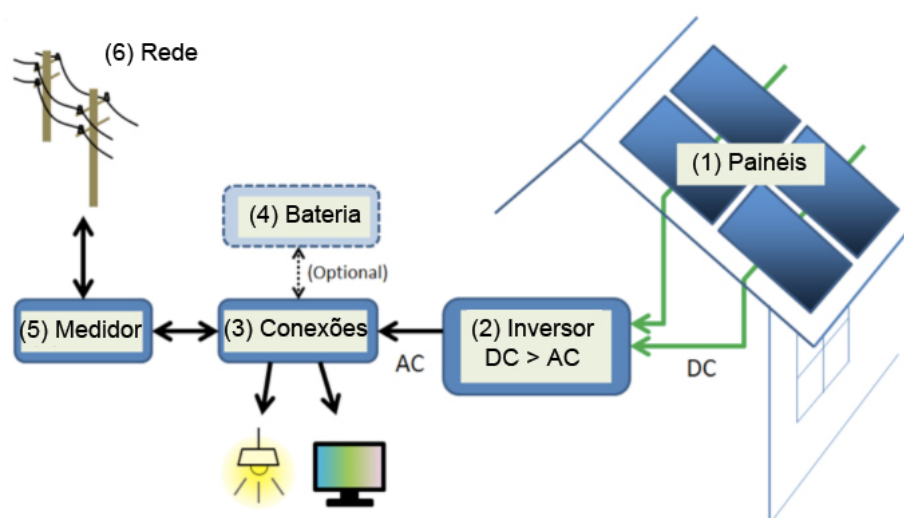


Figura 1.3 - Sistema básico PV

Segue a lista básica dos elementos que constituem um sistema PV:

Painéis (1): É o elemento mais dispendioso do sistema PV. A sua exposição, inclinação e dimensões afetam a performance do sistema, mais do que qualquer outro componente. A montagem dos painéis não tem só de responder à máxima captação como ficar instalado de forma a permanecer intacto e estável por mais de 25 anos.

Inversor DC-para-AC (2): É um circuito electrónico que converte a corrente contínua DC em corrente alternada AC com a frequência e amplitude desejada, tornando-a compatível com a rede. Do ponto de vista de confiabilidade, são geralmente o elo mais fraco em qualquer sistema de PV.

As conexões de cabos e caixa de fusíveis (3): Cablagem e conexões com a caixa de fusíveis são despesas de hardware menores, mas constituem uma grande parte do trabalho quando se está a instalar um sistema.

Bateria (4): Permite o armazenamento de parte da energia não utilizada. No entanto, ainda não é rentável utilizar baterias para o armazenamento de energia. Têm uma duração média de vida inferior a seis anos, são caras, apresentam problemas de segurança e quando se pretende maximizar o espaço disponível não são uma alternativa viável.

Medidor de potência (5): Contador da energia fornecida para a rede.

Rede (6): A energia que não é utilizada será vendida à rede. A grande maioria dos PVs instalados está ligada à rede. Estima-se que apenas 2% se encontre fora desta. Em Portugal, toda a energia produzida é vendida à rede. (Secção 1.2.2)

1.2 Panorama da utilização da energia solar

1.2.1 Na Europa e no mundo

Em 2011, a captação de energia solar através dos painéis fotovoltaicos (PV) foi adicionada ou acrescentada em muitos países. Quase 30 GW de capacidade foram adicionados, aumentando o total mundial para 70 GW. Em 2010 apenas tinham sido instalados 17 GW e em 2009 tinham sido 7.3 GW. Na União Europeia (UE), pela primeira vez, foi instalada mais energia solar do que qualquer outra tecnologia. Na Figura 1.4 pode ver-se como esse aumento tem sido exponencial nos últimos anos.

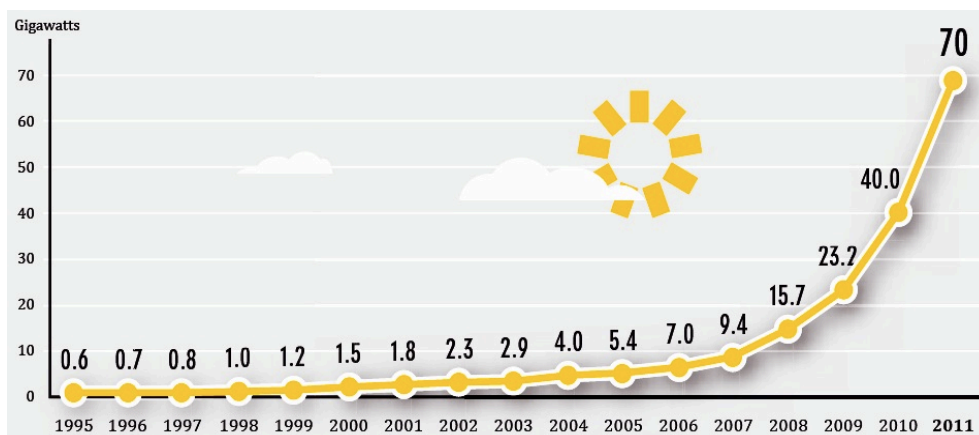


Figura 1.4 - Capacidade mundial de PV, 1995–2011

Fonte: Renewables 2012 - Global Status Report - REN21

A UE domina o mercado global com 3/4 da capacidade mundial de PV instalada, capaz de responder à procura de mais de 15 milhões de casas, graças à Itália e Alemanha, que juntos contabilizam mais 57% de capacidade mundial em 2011 (Fig. 1.5). Em 2011, a Alemanha adicionou 7.5 GW e a Itália adicionou 9.3 GW. A Alemanha já vinha sendo líder neste mercado e a Itália afirmou-se verdadeiramente em 2011. Outros países que se destacaram na Europa foram a França, a Bélgica e o Reino Unido que adicionaram 1.6 GW, 1 GW e 0.9 GW, respectivamente. O Reino Unido tinha apenas 75 MW em 2010. A Grécia e a Espanha adicionaram 0.4 GW e a Eslováquia adicionou 0.3 GW (Tab. 1.1).












#	País	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
1	 Alemanha	1,910	3,063	3,846	6,019	9,959	17,370	24,875
2	 Itália	46	58	120	458	1,157	3,478	12,763
3	 Espanha	58	118	733	3,421	3,438	3,808	4,214
4	 França	26	33	47	104	335	1,054	2,831
5	 Rep. Checa	0	1	4	55	463	1,953	1,959
6	 Bélgica	2	4	22	71	574	787	1,812
7	 Reino Unido	11	14	19	23	30	75	1,014
8	 Grécia	5	7	9	19	55	205	631
9	 Eslováquia	0	0	0	0.07	0.2	144	488
10	 Áustria	24	29	27	32	53	103	173
11	 Portugal	3	4	18	68	102	131	143

Tabela 1.1 – Quantidade PV instalada acumulada na Europa (MW) 2005-2011

Fora da Europa os maiores mercados em 2011 foram a China (adicionou 2.1 GW), os Estados Unidos da América (adicionaram 1.9 GW), o Japão (adicionou 1.3 GW) e a Austrália (adicionou 0.8 GW). O Japão encontra-se em terceiro no ranking global (Fig. 1.5). Em 2011, mais de 80% da capacidade instalada no Japão encontrava-se na cobertura de edifícios. Nos Estados Unidos, a queda dos preços combinada com os incentivos governamentais, fez com que se chegassem aos 4 GW totais instalados. A China tem rapidamente emergido e o seu mercado quadruplicou em 2011, graças à introdução de incentivos que promoveram este crescimento e a capacidade total chegou aos 3.1 GW. A Figura 1.5 mostra a percentagem de capacidade instalada em cada país.

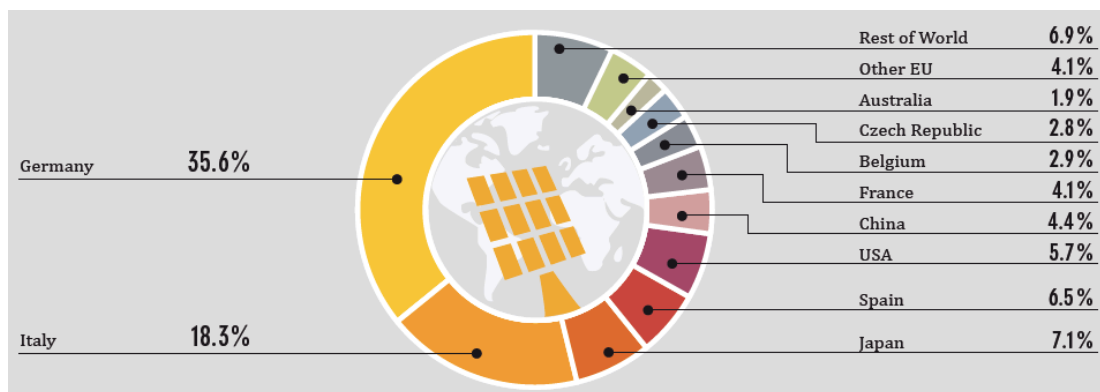


Figura 1.5 – Capacidade mundial de PV, Top 10 Países, 2011

Fonte: Renewables 2012 - Global Status Report - REN21

Grande parte desta capacidade é instalada em grandes centrais fotovoltaicas, estando a tornar-se cada vez mais comum a sua implementação no meio urbano, nomeadamente nas coberturas dos edifícios.

Segundo o *Renewables 2012*, o ano de 2011 foi bom para os consumidores e empresas do sector, no entanto, os fabricantes encontraram muitas dificuldades, com excesso de stock, preços em queda, diminuição do apoio por parte dos governos e um crescimento mais lento do mercado. Desta forma, os fabricantes europeus têm-se desviado para outros mercados, nomeadamente para a China.

A Figura 1.6 mostra o mapa de radiação solar para a Europa. Apesar da Alemanha não ser de todo um dos países europeus com maior potencial é o país que tem realizado mais investimentos neste sector.

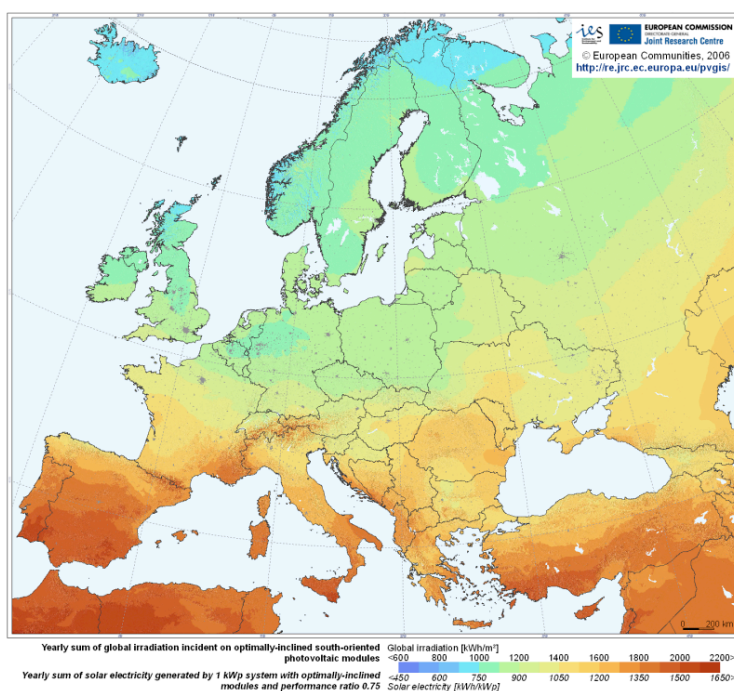


Figura 1.6 – Mapa de radiação solar para a Europa

Fonte: PVGIS

1.2.2 Em Portugal

Em Portugal, o potencial disponível é bastante considerável, sendo um dos países da Europa com melhores condições para o aproveitamento deste recurso, dispondo de um número médio anual de horas de Sol, variável entre 2200 e 3000 para o continente, e entre 1700 e 2200 para os arquipélagos dos Açores e da Madeira. Na Alemanha, por exemplo, este indicador varia entre 1200 e 1700 horas. A utilização de sistemas fotovoltaicos está ainda longe de corresponder ao potencial deste recurso no país. Em 2010 a capacidade instalada de sistemas solares fotovoltaicos era de cerca de 126 MW e em 2011 apenas foram instalados 12 MW, perfazendo um total de 143 MW. De acordo com as normas estabelecidas pela Comissão Europeia (REPAP 2020), Portugal terá de instalar até 2020 cerca de 2.5 GW, prevendo-se a obtenção de 4160 GWh/ano, o que representará 7.4% do consumo total de energia. Em 2011 os 143 MW de capacidade instalados geraram cerca de 200 GWh/ano, o que corresponde somente a 0.2% do consumo total de energia (Fig. 1.7).

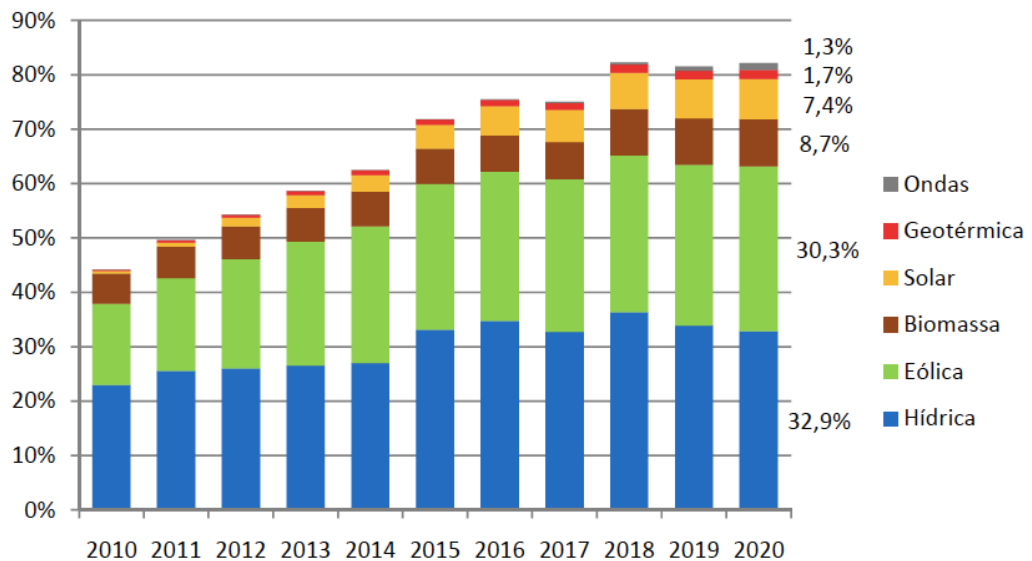


Figura 1.7 – Quota de eletricidade gerada por cada tecnologia em relação ao consumo total de eletricidade em Portugal (2010-2020)

Fonte: Roteiro Nacional das Energias Renováveis - Aplicação da Diretiva 2009/28/CE

A evolução prevista da contribuição das energias renováveis para a produção de eletricidade passará dos 55% em 2012 para os 82% em 2020.

Do potencial energético solar instalado em Portugal, destacam-se:

- **Central Fotovoltaica de Hércules** (Fig. 1.8)
 - Localizado em Serpa
 - 64 Hectares
 - 52 mil painéis fotovoltaicos com rendimento entre os 14% e os 18%
 - Abastece 8000 lares
 - Produz 21 GWh por ano
 - Menos 19 000 toneladas de CO₂ por ano.



Figura 1.8 - Central Fotovoltaica de Hércules

- **Central Fotovoltaica da Amareleja** (Fig. 1.9)
 - Localizado em Moura
 - 250 Hectares
 - 2520 Seguidores azimutais com 104 painéis cada um
 - Abastece 30 000 lares
 - Produz 93 GWh por ano



Figura 1.9 - Central Fotovoltaica da Amareleja

- **Parque Urbano do Mercado Abastecedor da Região de Lisboa** (Fig. 1.10)
 - Localizado no MARL
 - 45 000 m²
 - 28 000 painéis colocados em dois taludes e na cobertura de 11 edifícios
 - Abastece 3 000 lares
 - Tem instalada 6 MW
 - Menos 7 000 toneladas de CO₂ por ano



Figura 1.10 - Parque Urbano do Mercado Abastecedor da Região de Lisboa

A Central Fotovoltaica da Amareleja é uma das maiores do mundo para além de se encontrar instalada numa região privilegiada, sendo uma das regiões da Europa com maior radiação solar. O parque urbano instalado no Mercado Abastecedor da Região de Lisboa é para já o único “Urbano” em Portugal, não sendo exclusivamente urbano uma vez que parte da energia instalada encontra-se em taludes.

Em Portugal, tem-se tornado popular a microgeração, motivado por vários incentivos governamentais. A microgeração consiste na produção de eletricidade junto ao consumidor. O consumidor pode optar por utilizar a própria energia que produz, no entanto não poderá fazer uma venda do excedente à rede, uma vez que a lei prevê apenas a venda da totalidade da energia produzida. De qualquer modo, só conseguiria recuperar o investimento inicial em tempo útil mediante estas condições (dispensando a utilização de baterias). De acordo com a legislação em vigor, existem vários benefícios oferecidos ao produtor/consumidor.

Existem 2 regimes remuneratórios de venda de eletricidade à rede indicados na Tabela 1.2, cujas características estão indicadas na Tabela 1.3:

	Regime bonificado	Regime geral
Primeiros 8 anos	0,326 €/kWh	Preço de venda igual ao preço de compra (i.e. referente ao comercializador de último recurso)
7 anos seguintes	0,185 €/kWh	
A partir do 16 ano	Preço de venda igual ao preço de compra (i.e. referente ao comercializador de último recurso)	

Tabela 1.2 - Tarifa de venda à rede em 2012 (€/kWh produzidos)

Fonte: EDP

	Regime bonificado	Regime geral
Potência dos sistemas de microgeração	Instalações individuais: sistemas com potência de ligação até 3,68 kW Condomínios: sistemas com potência de ligação até 11,04 kW	Sistemas com potência de ligação até 5,75 kW
Tarifa de venda à rede	Tarifa bonificada garantida durante 15 anos Remuneração realizada com base na tarifa de referência que vigorar à data de atribuição do certificado de exploração da unidade de microgeração	Preço de venda igual ao preço de compra (i.e. referente ao comercializador de último recurso)
Condições de acesso	Instalações individuais: instalação de 2 m ² de painéis solares térmicos ou 1 caldeira a biomassa com produção idêntica Condomínios: aplicação de medidas de eficiência energética identificadas em auditoria energética com retorno até 2 anos	Não tem exigências

Tabela 1.3 – Características do regime bonificado e do regime geral

Fonte: EDP

1.3 A radiação solar

A radiação solar atinge a superfície terrestre com uma potência inferior à registada no topo da atmosfera (Fig. 1.11). Existem diversos fenómenos que influenciam a quantidade e a forma como a energia solar chega à superfície terrestre.

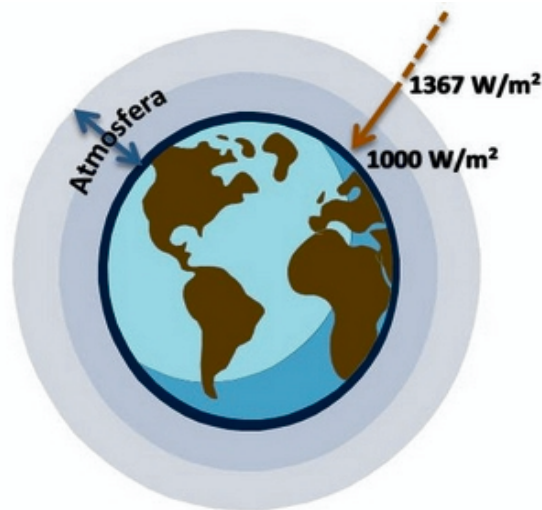


Figura 1.11 – Radiação solar antes e depois de atravessar a atmosfera

Assim, a radiação incidente num objeto pode provir de diferentes componentes da radiação. Geralmente, consideram-se as seguintes:

Radiação direta – Atinge diretamente um objeto sem que haja qualquer desvio nas partículas da atmosfera;

Radiação difusa – É desviada em diferentes direções pelos componentes da atmosfera, tal como gases (dispersão de *Rayleigh*) e aerossóis (que incluem partículas de poeira e sulfato, pólen, etc.);

Radiação refletida – É proveniente da reflexão da radiação no solo e objetos circundantes. Depende da capacidade refletiva dos objetos.

A Figura 1.12 mostra um esquema do percurso realizado pelas diferentes componentes.

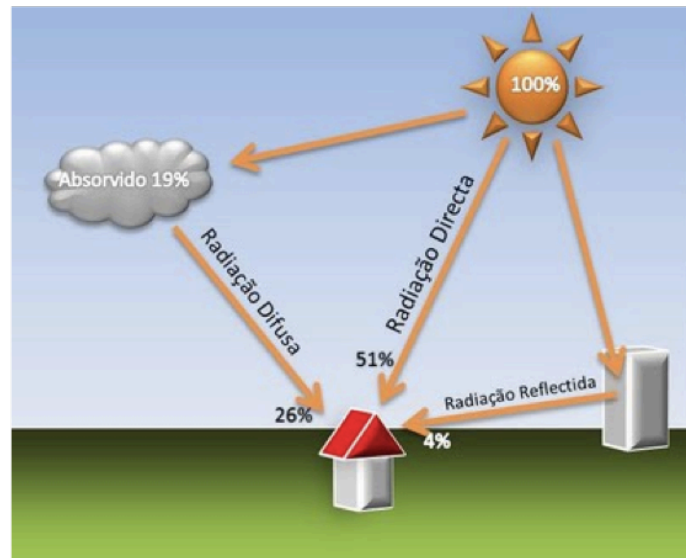


Figura 1.12 – Percurso das diferentes componentes da radiação solar

Apesar de haver perda de energia na passagem da radiação solar pela atmosfera, um objeto pode ser irradiado pelas diferentes componentes, logo parte destas perdas podem ser, de certo modo, compensadas. Geralmente, a uma perda da radiação direta corresponde um aumento na radiação difusa.

1.3.1 A variação espaço-temporal

A radiação solar varia ao longo do tempo e do espaço (Yu, 2009). A variação temporal da radiação solar é causada pela variação horária e sazonal. A rotação da Terra é responsável pela variação horária ao longo de um dia. Num dia de céu limpo, a radiação solar é mais intensa no momento em que a elevação solar apresenta o seu maior ângulo em relação ao horizonte. A variação sazonal dá-se uma vez que a orientação do eixo da Terra em relação ao Sol muda ao longo do ano, o que torna o ângulo máximo de elevação solar diferente para cada dia do ano. De uma forma geral, a distribuição espacial da radiação solar à escala global é derivada da latitude geográfica. As regiões tropicais e equatoriais estão mais expostas à radiação solar do que as regiões polares. A uma escala local e regional, a superfície topográfica e a complexidade urbana tornam-se o fator dominante na variação da radiação solar.

1.3.2 Fatores que influenciam a radiação solar até à superfície terrestre

Para definir os modelos matemáticos que estimem a quantidade de radiação solar recebida à superfície, consideremos 3 grupos de fatores (Hofierka, 2002):

- 1) Geometria da Terra, translação e rotação (declinação, latitude, ângulo solar horário);
- 2) Terreno (elevação, declive, orientação, sombras)
- 3) Atenuação atmosférica (dispersão, absorção)
 - a) Gases (moléculas de ar, camada do ozono, CO₂ e O₂)
 - b) Partículas líquidas e sólidas (aerossóis, água não condensada)
 - c) Nuvens (água condensada)

O primeiro grupo pode ser calculado com precisão através de fórmulas astronómicas. O segundo grupo depende do objetivo, pois requer dados que dependem do facto de se modelar a radiação a uma escala global ou local. Para uma escala local em zonas urbanas é necessário ter em conta a complexidade urbana pelo que a qualidade dos resultados vai depender da qualidade dos dados de entrada, por exemplo: MDT *vs* MDS. O terceiro grupo também será crítico pela dinâmica da natureza e a complexa interação entre partículas. Os gases e as partículas são parâmetros que ainda se conseguem determinar com algum rigor, na medida em que existe alguma estabilidade destes valores ao longo do tempo. O mais difícil de tratar será a questão da nebulosidade, pelo facto de ser difícil a sua previsão e o seu impacto ser bastante relevante no cálculo da radiação.

1.3.3 A relevância do modelo matemático

Os modelos de radiação solar juntamente com as tecnologias SIG permitem obter uma boa relação custo-benefício, possibilitando a simulação da radiação solar recebida em condições complexas (urbanas e topográficas) numa vasta quantidade de território, usando variáveis como o declive (*slope*), orientação (*aspect*) e o efeito das sombras (*shadows*). Os SIG podem contribuir efetivamente para a avaliação do potencial energético dado que apresentam ferramentas importantes para o processamento complexo da informação espacial. Uma outra vantagem da utilização de um modelo matemático tem a ver com a escala temporal. Por exemplo, a maioria dos dados fornecidos pelas estações meteorológicas são baseados em médias mensais. O modelo permite utilizar uma escala temporal de acordo com as necessidades do utilizador (Scharmer, 2000).

1.3.4 Contexto urbano

A grande concentração de pessoas e o aumento das atividades económicas tem feito com que existam maiores necessidades energéticas nos centros urbanos, ao mesmo tempo que se procura ter um planeta cada vez mais sustentável e ecológico. Segundo Hofierka (2009), o consumo energético em muitos países pode ser completamente satisfeito através do aproveitamento da radiação solar usando apenas 1% do seu território. Os modelos de radiação solar foram inicialmente concebidos para grandes áreas topográficas, no entanto com o surgimento e acessibilidade de dados espaciais de alta resolução, a sua aplicação ao complexo meio urbano tornou-se uma realidade, viabilizando ainda mais a utilização destes modelos.

1.4 Estações meteorológicas e satélites

As duas principais fontes de informação relativa à radiação solar na superfície da Terra são as estações meteorológicas e os satélites. As estações meteorológicas têm a vantagem de conter grandes quantidades de informações provenientes de longos períodos de levantamentos. A principal vantagem dos métodos baseados em satélites é que eles fornecem uma cobertura uniforme para largas áreas enquanto que as estações meteorológicas terrestres encontram-se muito distantes. No entanto, os seus resultados podem ser utilizados conjuntamente, de modo que, a qualidade das medições feitas por satélites possam ser verificadas por comparação com as medições feitas por estações meteorológicas de alta qualidade.

As medições da radiação solar feitas diretamente na superfície terrestre podem utilizar vários instrumentos. Um dos mais utilizados é o pirómetro. Tipicamente, os instrumentos medem toda a radiação proveniente do Sol, considerando as condições reais. Um dos problemas possíveis nas medições, para além de falhas no próprio sistema de medição, é o sensor poder ficar coberto com poeira, geada, ou neve, ou o sensor estar à sombra de árvores e construções que se encontram nas suas imediações por algum tempo durante o ano. Estes problemas podem ser resolvidos com uma instalação e manutenção cuidadosas. O Centro Geofísico da Universidade de Coimbra dispõe de uma estação meteorológica onde têm sido obtidos os mais diversos tipos de dados meteorológicos desde 1864, onde se inclui a radiação solar.

Existem vários métodos para estimar a radiação solar na superfície usando dados de satélites. Tipicamente os satélites medem a luz (visível e infravermelho) que vem da

superfície terrestre. Esta luz é principalmente a luz reflectida da superfície ou das nuvens. O cálculo da radiação solar pelos satélites deve ter em consideração a radiação absorvida pela atmosfera bem como a reflectida pela nuvens. Diferentes tipos de satélites podem ser usados para estimar a radiação solar. Satélites meteorológicos geoestacionários estão constantemente a captar imagens da Terra em intervalos de 15 ou 30 minutos, por isso têm uma muito boa resolução temporal, no entanto, cada pixel das imagens captadas representará uma área relativamente grande. Os satélites com órbita polar sobrevoam a Terra a uma altitude menor e a resolução espacial é melhor. Contudo, não ficam permanentemente numa área em particular, por isso apenas captam uma quantidade menor de imagens de uma dada área. Apesar de serem cada vez mais utilizados ainda apresentam potenciais problemas como:

- Neve na superfície, uma vez que se confunde com as nuvens nas imagens de satélite. Existem métodos que minimizam o problema, mas que têm um grau de incerteza elevado.
- Em montanhas, um pixel pode cobrir uma área com uma grande variação de altitude. Desta forma, e uma vez que a altitude é um parâmetro a ter em conta no cálculo da radiação, os resultados da radiação solar poderão ser influenciados.
- Quando o Sol se encontra muito baixo o cálculo da radiação pelos satélites pode ficar também comprometido em particular no inverno e em altas latitudes.

1.4.1 ESRA

A ESRA (*European Solar Radiation Atlas*) é uma base de dados que contém informação útil para o cálculo da radiação solar. Resulta da colaboração de diversas entidades europeias que juntaram a informação relativa a 566 estações meteorológicas europeias, onde se inclui a estação de Coimbra. A base de dados está organizada em *Digital maps* e *Station data*. Os mapas abrangem toda a Europa e contém informação relativa à radiação global. Esses mapas são obtidos pela interpolação dos valores de radiação solar das estações, mas também de alguns satélites e apresentam médias mensais da radiação solar. As estações contêm informação diversa relativamente à radiação solar. O período de medições é referente ao intervalo de 1 de Janeiro de 1981 a 31 de Dezembro de 1990.

1.4.2 PVGIS

O PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*) é um instrumento de pesquisa e simulação para avaliar a energia solar no contexto da sua gestão e distribuição. É constituído por uma base de dados que contém a seguinte informação para a Europa:

- Dados geográficos: Modelos digitais de superfície, regiões administrativas, toponímia das cidades, ..
- Dados climáticos: representam as médias mensais e anuais de:
 - Radiação global no plano horizontal
 - Factor de *Linke* T_{LK}
 - Rácio entre a radiação difusa e global $\frac{D}{G}$
 - Ângulo óptimo para a implementação dos PV
- As médias regionais para as áreas construídas:
 - Total anual da radiação global (plano horizontal, vertical e inclinado)
 - Total anual da estimação da energia solar gerada
 - Ângulo de declive óptimo para a instalação dos módulos PV maximizando o seu rendimento durante um ano.

As principais fontes de dados utilizados no desenvolvimento da base de dados são:

1. Médias mensais da radiação global e difusa diárias medidas por 566 estação meteorológicas distribuídas por toda a Europa. Os dados foram recolhidos através do projeto ESRA;
2. Factor de *Linke* T_{LK} derivado da base de dados global disponível no *SoDa*³ (Redmund et al., 2003). Os valores podem ser consultados no seu site para todo mundo;
3. Modelos digitais de superfície (MDS) com uma resolução de 1x1 km, derivados do USGS SRTM data.

A base de dados da radiação solar foi desenvolvida utilizando ferramentas integradas no GRASS GIS, nomeadamente com o modelo de radiação solar *R.Sun*. A base de dados foi compilada em três passos:

1. Cálculo das radiações direta e difusa com condições de céu limpo na superfície horizontal a partir do modelo;

³ www.soda-is.com

- Interpolação do *Clear-sky index* através dos mapas de radiação solar obtidos no ponto 1 e os mapas de radiação solar com as condições reais na superfície horizontal obtidos através das Estações Meteorológicas;
- Com o *Clear-sky index* obtido para a componente direta e difusa no ponto 2, calculou-se os mapas de radiação global em superfícies inclinadas.

1.4.3 Avaliação da precisão dos dados da ESRA e do PVGIS

O *Institute for Energy and Transport* do *JRC European Commission* são a entidade responsável pela plataforma PVGIS. No seu website⁴ está disponível uma avaliação da precisão dos dados da ESRA e do PVGIS. O Erro Médio Quadrático (EMQ) da radiação solar para PVGIS e a ESRA está presente na Figura 1.13.

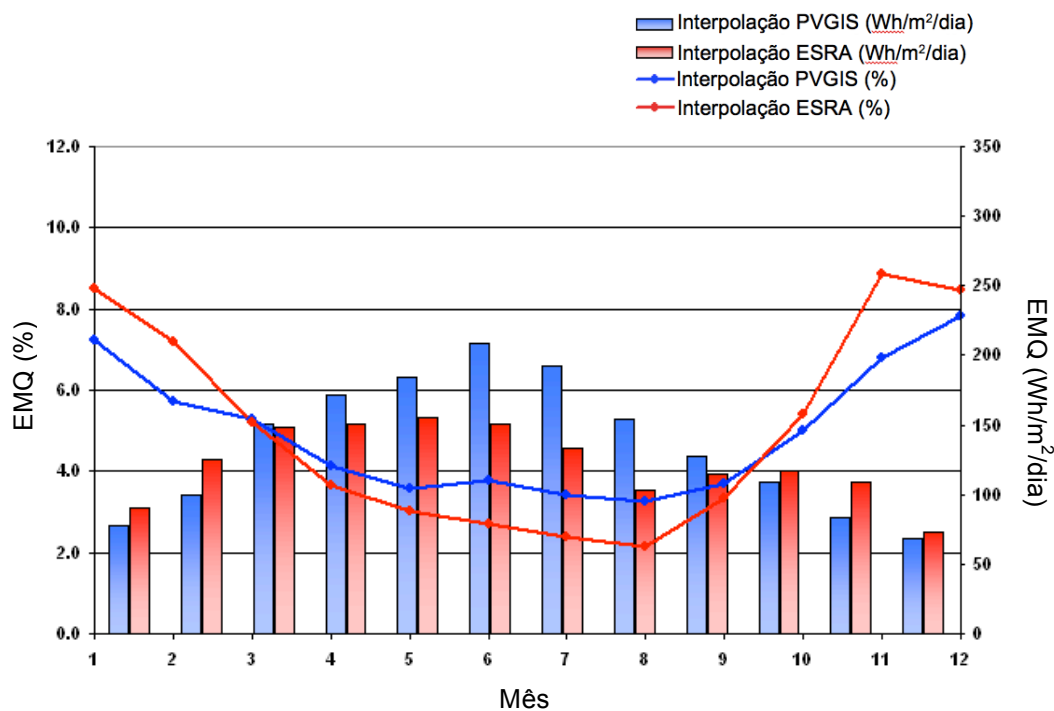


Figura 1.13 - EMQ (Erro médio quadrático) no PV-GIS e na ESRA

Fonte: PVGIS

Para o PVGIS, as médias anuais da radiação solar diária têm um erro médio (diferença entre o valor expectável estimado e o valor real) de 89 Wh/m²/dia (0.3%) e um EMQ igual a 118 Wh/m²/dia (3.7%). Por sua vez, o EMQ obtido para a ESRA é igual a 113 Wh/m²/dia (3.5%). Embora para o PVGIS e para a ESRA a precisão seja praticamente a mesma, os valores do PVGIS mostraram ser ligeiramente melhores no período de Outubro a Abril e piores nos meses de verão em relação aos valores da ESRA.

⁴ <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/solres/solrespvgis.htm>

1.4.4 Factor de Linke

O Factor de *Linke* T_{LK} , designado internacionalmente por *Linke Turbidity Factor*, é uma aproximação para o modelo de absorção e dispersão atmosférica da radiação solar. Inclui a absorção pelo vapor de água e absorção e dispersão pelas partículas de aerossóis para uma atmosfera limpa e seca. Se o céu está limpo e seco, T_{LK} deverá ser igual a 1. Quando o céu está profundamente azul T_{LK} é menor. No verão, na Europa, a quantidade de vapor de água na atmosfera é grande e o céu azul encontra-se mais branco. O T_{LK} chega a ser maior do que 3. Em cidades grandes com grandes índices de poluição, T_{LK} chega a ser maior do que 6. O valor típico para a Europa é 3. No entanto, este valor sofre variações no espaço e no tempo.

Os valores do Factor de *Linke* podem ser consultados através do *SoDa Web Service*, que tem valores disponíveis para todo o mundo.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivos gerais

Nesta dissertação pretende-se simular a radiação solar através de um modelo matemático de forma a estudar o potencial energético solar nas coberturas dos edifícios da cidade de Coimbra. No entanto, os modelos desenvolvidos foram ainda pouco explorados no meio urbano, para além de existirem ainda algumas dúvidas em relação à sua competência.

Nesta dissertação, pretende-se estudar de forma detalhada todas as características a ter em consideração na modelação da radiação solar, comparar entre si diferentes modelos disponíveis em ambiente SIG e verificar quais as vantagens e desvantagens de cada um, e ainda encontrar um modelo que simule a radiação solar com rigor e com a particularidade de se adaptar o melhor possível ao meio urbano, mais especificamente à cidade de Coimbra.

1.5.2 Objetivos específicos

Relativamente aos objetivos específicos pretendemos:

Efetuar uma revisão bibliográfica com o intuito de:

- Descrever os parâmetros utilizados no cálculo da Radiação Solar;
- Descrever os modelos de radiação *Shortwave*, *R.Sun* e *Solar Analyst*;
- Validar os modelos com os dados de estações meteorológicas e satélites.

Fazer uma análise comparativa dos modelos:

- Analisar os parâmetros usados nos diferentes modelos;
 - Identificar os parâmetros equivalentes
 - Compará-los graficamente
- Aplicar cada um dos modelos na área onde se encontra instalada a estação meteorológica de Coimbra e comparar os resultados obtidos com os dados da estação;
- Considerar um edifício simples localizado em Coimbra e analisar qualitativa e quantitativamente o comportamento para cada uma das componentes da radiação. Comparar com os dados do PVGIS.

Escolher o modelo que se ajuste melhor à zona de estudo:

- Aplicar o modelo à cidade de Coimbra;
- Calcular o potencial PV da cobertura de alguns edifícios de Coimbra.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Modelação da radiação solar

2.1.1 Constante solar

A constante solar S_0 é a energia proveniente do Sol, por unidade de tempo, recebida numa superfície perpendicular à direção de propagação da radiação, a uma distância média Terra-Sol, fora da atmosfera. Segundo a *World Meteorological Organization*, esse valor é de 1367 W/m^2 , com uma incerteza na ordem de 1% (Duffie, 1991). A distribuição espectral dessa radiação é resultado da incidência de diferentes comprimentos de onda λ , tal como mostra a Figura 2.1.

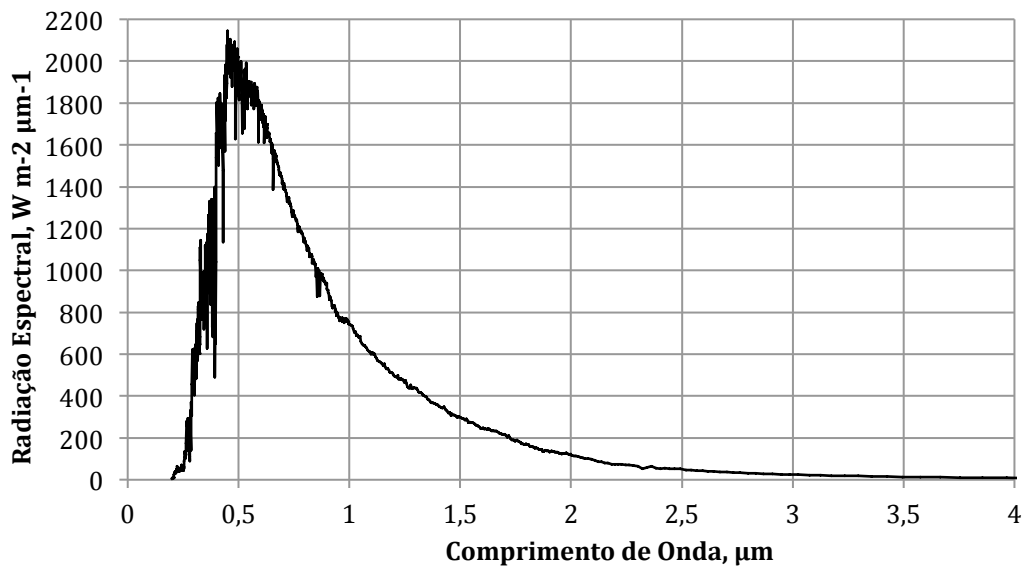


Figura 2.1 – Curva da distribuição da radiação espectral do Sol

Fonte: *World Meteorological Organization*

Essa radiação é proveniente de raios na gama do ultravioleta ($\lambda \leq 0,38 \mu\text{m}$), luz visível ($0,38 \mu\text{m} < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$) e infravermelho ($\lambda \geq 0,78 \mu\text{m}$), que correspondem a 6.4%, 48%, e 45.6% do total de radiação, respectivamente (Duffie, 1991).

2.1.2 Excentricidade da órbita

A variação da distância Terra-Sol tem de ser tomada em conta e atinge uma variação na ordem dos $\pm 3\%$, dependendo dos dias do ano. O Sol encontra-se mais perto da Terra no solstício de inverno (periélio) e mais longe no solstício de verão (afélio) (Fig. 2.2).

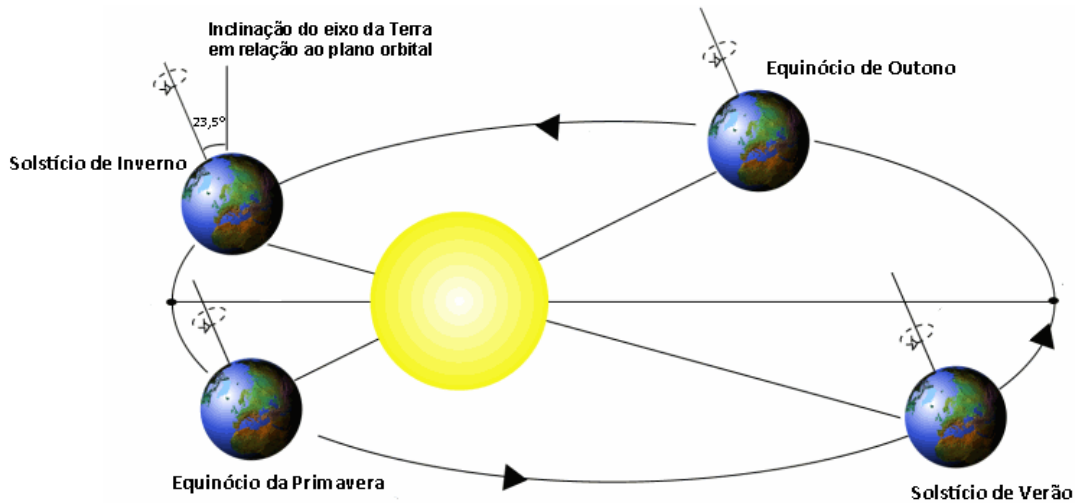


Figura 2.2 – Esquema da distancia Terra-Sol ao longo do ano

A excentricidade da órbita ε pode ser calculada através da Equação 2.1 (Duffie, 2001).

$$\varepsilon = 1 + 0.0344 \cos \left[2\pi \frac{N}{365} \right] \quad (2.1)$$

Onde N é o número do dia do ano e varia entre 1 e 365.

2.1.3 Radiação extraterrestre

A radiação extraterrestre R_0 diz respeito há radiação solar fora da atmosfera e é dada pela Equação 2.2.

$$R_0 = S_0 \cdot \varepsilon \quad (2.2)$$

O gráfico da Figura 2.3 mostra a variação da radiação extraterrestre R_0 ao longo de um ano.

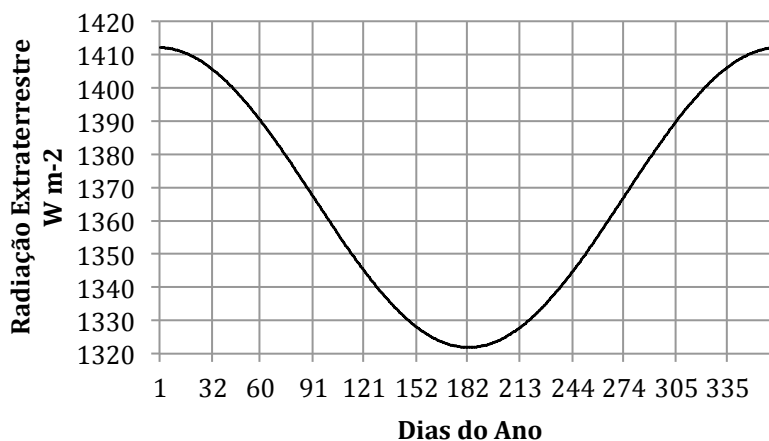


Figura 2.3 – Variação da radiação extraterrestre ao longo do ano

Fonte: (Duffie, 2001)

2.1.4 Ângulo de elevação e ângulo azimutal solar

A variação da posição relativa do Sol em relação a um ponto à superfície da Terra, pode ser descrita através das fórmulas astronómicas que medem o ângulo de elevação α (Eq. 2.3) e o ângulo azimutal β (Eq. 2.4), em função da latitude ϕ , declinação solar δ e do ângulo horário h (Kreith, 1978):

$$\sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \quad (2.3)$$

$$\sin \beta = \frac{\cos \delta \sin h}{\cos \alpha} \quad (2.4)$$

2.1.5 Declinação solar

A declinação solar δ é o ângulo entre a direção do Sol e o plano formado pelo equador da Terra. Segundo Duffie (1991), a declinação solar δ é dada por (Eq. 2.5):

$$\delta = \frac{23.45 \pi}{180} \sin \left[2\pi \frac{284 + N}{365} \right] \quad (2.5)$$

A declinação solar δ varia entre -23.45° e 23.45° ao longo do ano, podendo considerar-se constante para um dia N .

2.1.6 Ângulo horário

O ângulo horário h é medido de Este para Oeste a partir do meridiano local e tem um valor positivo de manhã e um valor negativo de tarde. Este ângulo varia 15° por hora e diz respeito ao ângulo formado pelo plano do meridiano local e o plano formado pelo eixo da Terra e o Sol (Fig. 2.4).

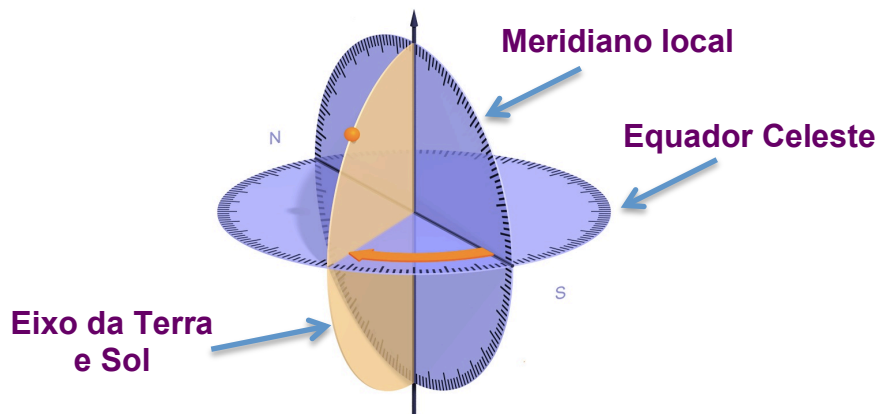


Figura 2.4 –Variação do ângulo horário

Para a implementação do modelo torna-se necessário determinar o período ao longo do dia em que o Sol se encontra acima do horizonte. Esse período pode ser calculado se for conhecido o ângulo horário ao nascer e ao pôr do Sol, isto é, quando o Sol intersecta o horizonte. Nos instantes do nascer e pôr do Sol, o ângulo de elevação solar é igual a 0 ($\alpha = 0$), ou seja, $\sin(\alpha) = 0$. Logo, utilizando a Equação 2.3, obtém-se o seguinte ângulo horário para o nascer do Sol (Eq. 2.6):

$$h_{ns} = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (2.6)$$

O ângulo horário ao pôr do sol não é mais do que o valor inverso do ângulo horário ao nascer do sol (Eq. 2.7).

$$h_{ps} = -h_{ns} \quad (2.7)$$

Uma vez calculado o ângulo horário do nascer e do pôr do sol é apenas necessário definir qual o intervalo de tempo a considerar nos cálculos da radiação (intervalo incremental). Isto é, com o ângulo horário do nascer e do pôr do sol definido basta dividi-lo em partes iguais, sendo que quantos mais partes se considerar, mais rigorosos serão os cálculos, no entanto, será maior o tempo de processamento.

2.1.7 Ângulo de incidência solar

O ângulo de incidência solar i é o ângulo entre o raio solar e a normal da superfície. A posição do raio solar é definida pelo ângulo de elevação solar α e pelo ângulo do azimute solar β , enquanto que a normal à superfície é definida pelo declive do terreno S (*Slope*) e pela orientação A (*Aspect*). Desta, forma o ângulo de incidência solar i , é dado pela seguinte expressão (Eq. 2.8):

$$\cos i = \sin S \cos \alpha \cos(\beta - A) + \cos S \sin \alpha \quad (2.8)$$

2.1.8 Declive e orientação

O declive do terreno S é calculada pela variação altimétrica na superfície. O declive varia entre 0° e 90° . É dado pela seguinte expressão (Eq. 2.9):

$$S = \text{atan} \sqrt{\left[\frac{dz}{dx}\right]^2 + \left[\frac{dz}{dy}\right]^2} \quad (2.9)$$

A orientação do terreno A representa a direção, projetada na horizontal, do vetor normal à superfície. Cada valor da orientação é obtido através de cada face inclinada do terreno. Por exemplo, se uma face do terreno estiver virada a Sul, terá um valor próximo de $\frac{3\pi}{2}$ (270°), se estiver virado a Este terá um valor próximo de $\frac{\pi}{2}$ (90°). Para o terreno plano é atribuído o valor de -1 . A orientação varia entre 0 (0°) e 2π (360°) e tem a seguinte expressão (Eq. 2.10):

$$A = \frac{3\pi}{2} + \text{atan} \frac{dx}{dy} - \frac{\pi}{2} \frac{\frac{dz}{dx}}{\left|\frac{dz}{dx}\right|} \quad (2.10)$$

Onde $\frac{dz}{dx}$ e $\frac{dz}{dy}$ são as derivadas parciais da superfície topográfica z nas direções x e y , respectivamente. Estas derivadas são habitualmente calculadas utilizando diferenças finitas, nos casos em que a superfície z é representada através duma grelha regular. Tanto o declive S como a orientação A do terreno são obtidas a partir de um MDS e podem ser calculadas diretamente através de um software SIG como o *ArcGIS* ou o *GRASS GIS*, que dispõem destas funções na sua *Toolbox*.

2.1.9 Massa de ar

No percurso da radiação até chegar à superfície, a radiação atravessa toda a camada atmosférica. Essa camada a atravessar é maior quando o Sol se encontra mais perto do horizonte e é menor quando o Sol se encontra com uma elevação solar maior (Fig. 2.5). Desta forma, para uma atmosfera uniforme, pode considerar-se que a massa de ar M (Eq. 2.11) depende da elevação solar α , aproximadamente da seguinte forma:

$$M \cong \frac{1}{\cos \left[\frac{\pi}{2} - \alpha \right]} \quad (2.11)$$

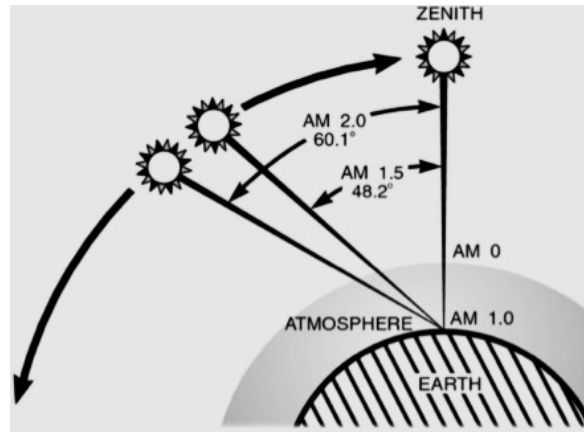


Figura 2.5 – Variação da massa de ar

É igual a 0 fora da atmosfera e igual a 1 à superfície da Terra, quando o Sol se encontra a uma altitude de 90° . Aumenta à medida que a altitude solar diminui. Várias formulas mais complexas são aplicadas por diversos autores, considerando para além da elevação solar, a refração atmosférica, altitude do lugar, ...

2.1.10 Transmitância atmosférica

No percurso da radiação solar até chegar à superfície existe uma perda significativa de energia derivada da passagem da radiação pela massa de ar M . A radiação é atenuada por dispersão e absorção parcial. Para quantificar este fenómeno é necessário considerar os vários constituintes da atmosfera, entre os quais se destacam: o ozono (O_3), que absorve entre 1.5% e 3% da radiação, afetando sobretudo os comprimentos de onda $<0.29 \mu m$; vapor de água (H_2O), que depende em grande parte das condições locais; as moléculas de ar (dispersão de Rayleigh S_R) e os aerossóis, que absorvem entre 9 e 12% da radiação total. O efeito de dispersão e absorção dos aerossóis, é uma das atenuações mais significativas, e é muitas vezes caracterizado pelo Factor de *Linke* T_{LK} (Remund, 2003) ou pelo Coeficiente de *Angstrom* \AA (Cañada, 1992). Para uma massa de ar M igual a 1, o efeito de atenuação da radiação pelos diferentes constituintes da atmosfera ao longo dos diferentes comprimentos de onda é o seguinte (Fig. 2.6):

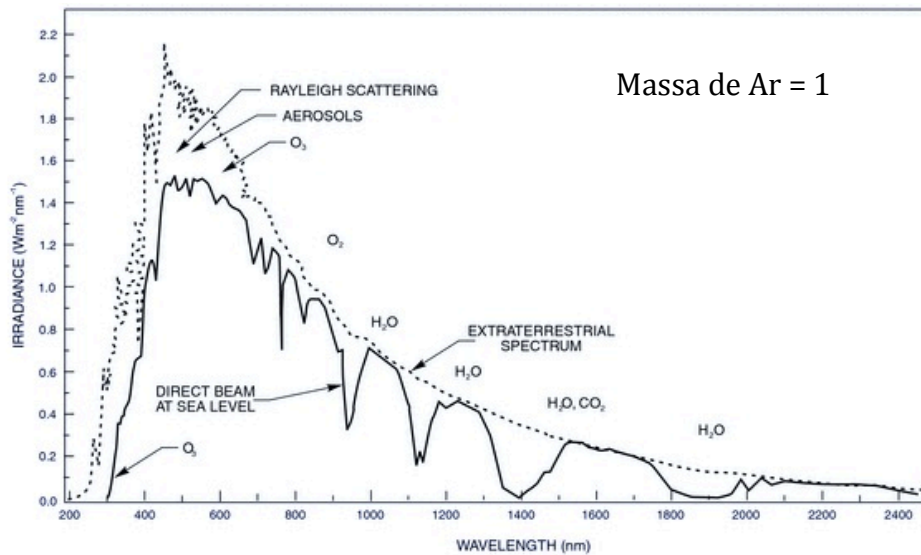


Figura 2.6 – Comparação da incidência normal do espectro solar ao nível das águas do mar num dia de céu limpo (curva contínua) com a radiação extraterrestre (curva a tracejado).

Fonte: <http://www.newport.com/Introduction-to-Solar-Radiation/411919/1033/content.aspx>

A transmitância atmosférica τ_d visa quantificar estas perdas e pode ser obtida pelo produto de todos os constituintes S (Eq. 2.12):

$$\tau_d = S_{Rayleigh} S_{Aerossóis} S_{Água} S_{Ozono} S_{Gases} \quad (2.12)$$

Cada constituinte é estimado de forma diferente. Por exemplo, a transmitância atmosférica dos aerossóis, $T_{Aerossóis}$, pode ser escrita da seguinte forma:

$$T_{Aerossóis} = e^{(-\tilde{A}\lambda^{-\theta}M)} \quad (2.13)$$

Onde \tilde{A} é o Coeficiente de *Angstrom*, θ é o expoente do comprimento de onda λ e M é a massa de ar. Tal como veremos mais adiante, os modelos tendem a simplificar a função da transmitância atmosférica τ_d .

2.1.11 Radiação direta

A radiação direta é dada por (Eq. 2.14):

$$R_d = R_0 \tau_d \cos i \quad (2.14)$$

A radiação direta, é resultado do produto entre a radiação extraterrestre R_0 , a transmitância atmosférica τ_d e o cosseno da incidência solar i .

2.1.12 Radiação difusa

A radiação difusa é abordada de diferentes formas pelos vários modelos, não existindo uma fórmula genérica utilizada para esta componente da radiação. No entanto, existe uma relação inversa entre a radiação difusa e a radiação direta, na medida em que, parte da radiação direta é dispersa na atmosfera e acaba por chegar à superfície, sob a forma de radiação difusa. Essa relação inversa costuma ser expressa no factor de transmitância da radiação difusa τ_f , que será tanto maior quanto menor for τ_d .

2.1.13 Radiação refletida

Uma pequena parte da radiação que atinge um ponto à superfície pode ser proveniente da reflexão da radiação. A esta componente costuma estar associado um parâmetro que quantifica a capacidade refletora da superfície, denominado de *Albedo* r . Os valores para este parâmetro variam de acordo com as superfícies e estão referenciados em diversas fontes, como se pode ver na Tabela 2.1.

Material/Categoria	Albedo	Referência
Superfície Impermeável		
Betão	0.23	Oke 1987
Cimento	0.25	Levinson and Hashem 2001
Tijolo	0.30	Oke 1987
Calcário	0.28	Oke 1987
Aço	0.18	Akbari and Desjarlais 2007
Asfalto	0.14	Berdahl and Bretz 1997
Granito	0.33	Jackson, 2010
Arenito	0.35	Jackson, 2010
Madeira não pintada	0.40	Jackson, 2010
Madeira pintada	0.38	Jackson, 2010
Ferro	0.13	Oke 1987
Solo e Vegetação		
Solo (Escuro e Húmido)	0.05~0.4	Ahrens, C. D. 2006
Solo (Iluminado e Seco)	0.15~0.45	Ahrens, C. D. 2006
Relva	0.16~0.26	Ahrens, C. D. 2006
Culturas agrícolas	0.18~0.25	Ahrens, C. D. 2006
Planície	0.18~0.25	Ahrens, C. D. 2006
Florestas tropicais	0.15~0.20	Ahrens, C. D. 2006
Florestas temperadas	0.05~0.15	Ahrens, C. D. 2006
Neve	0.40~0.95	Ahrens, C. D. 2006

Tabela 2.1 – Valores de *Albedo* para diferentes tipos de superfícies

2.1.14 Nebulosidade

Ao longo desta dissertação far-se-á referência ao *Clear-sky index* k_c . Este fator quantifica a quantidade de nebulosidade, mais especificamente, a quantidade média de céu limpo para um determinado período. Alguns modelos foram concebidos para calcular a radiação solar com o céu limpo, considerando apenas a atenuação atmosférica provocada por elementos que se mantêm relativamente constantes na atmosfera ao longo do tempo. A nebulosidade é um fator de grande imprevisibilidade, mas não menos relevante que os outros. No entanto, não é óbvia a forma como se pode determinar este parâmetro, dado que facilmente se confunde com outros elementos que atenuam a chegada da radiação à superfície. As nuvens apresentam uma grande heterogeneidade na sua constituição e a existência das mesmas não representa uma absorção total da radiação. A nebulosidade também só fará sentido considerar quando se pretende estimar a radiação para períodos longos e onde se disponham de dados médios relativos à nebulosidade. É comum estimar *Clear-sky index* através da razão entre os valores de radiação medidos numa estação meteorológica e um modelo matemático que simule a radiação solar, sendo que a estação meteorológica calcula a radiação sob as condições de céu reais. Basicamente, este é o parâmetro que se conhece com menor exatidão, apesar de essencial para obter os valores de radiação que melhor representam a realidade.

2.1.15 Sombras

Existem várias formas de os modelos calcularem o efeito das sombras, entre as quais se destacam:

- A função *Hillsshade* calcula para cada instante de processamento, um *raster* binário com os pixéis irradiados e os pixéis em sombra de todo o MDS. Ao mesmo tempo que se obtêm os valores de radiação solar para cada instante, utiliza-se o *raster* binário para considerar apenas os pixéis irradiados.
- A função *Viewshed* calcula para cada pixel o levantamento de todas as obstruções (Fig. 2.7).

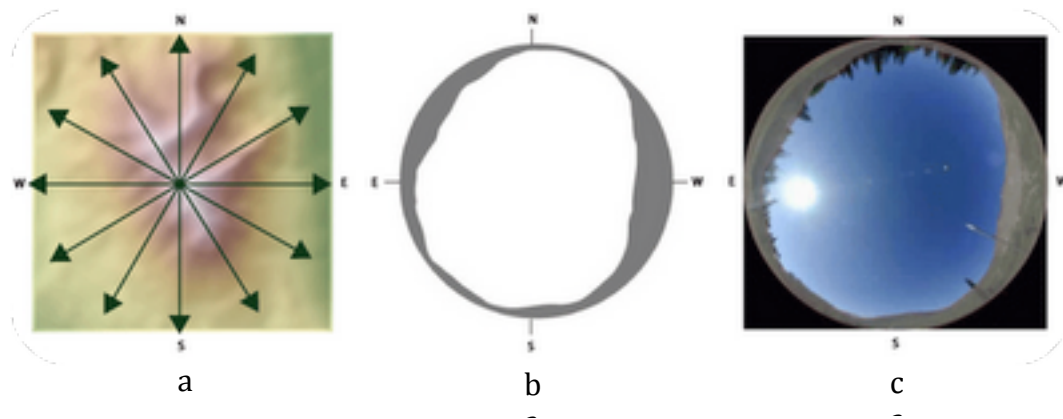


Figura 2.7 - Levantamento das obstruções para criar a vista hemisférica

A Figura 2.7 a) representa o ponto a partir do qual são realizados todos os levantamentos das obstruções. Essas obstruções dizem respeito a todos os objetos em redor desse ponto que podem num determinado momento impedir a passagem direta da radiação proveniente do sol. A Figura 2.7 b) é um exemplo do levantamento dessas obstruções. A Figura 2.7 c) é um exemplo real da vista hemisférica a partir de um ponto.

2.2 Modelos de radiação solar

Vários modelos têm sido desenvolvidos para simular a radiação solar na superfície terrestre, entre os quais se destacam o *Shortwave*, o *Solar Analyst* e o *R.Sun*. Entre eles têm em comum o mesmo objetivo final, que é fornecer um mapa de radiação solar, no entanto, a abordagem e forma de atingir esse objetivo por parte dos modelos apresentam algumas diferenças, tal como veremos de seguida.

2.2.1 Shortwave

O *Shortwave* foi um modelo desenvolvido por Kumar (1997) para simular radiação solar. Inicialmente, foi aplicado a grande áreas, sobretudo em florestas, onde a variação espacial da radiação solar é mais complexa que os valores calibrados obtidos por estações meteorológicas. Segundo as suas características, o modelo calcula apenas o potencial da radiação solar sob condições de céu limpo. Desta forma, para considerar as condições reais será necessário aplicar posteriormente um *Clear-sky index*. Para calcular o efeito das sombras, o *Shortwave* utiliza a função *Hillshade*. Para executar este modelos é necessário introduzir os seguintes dados de entrada:

- MDS
- Latitude (Um valor)
- Primeiro dia da simulação

- Último dia da simulação
- Intervalo incremental

2.2.1.1 Radiação direta

Para o cálculo da radiação direta R_d , o *Shortwave* considera a constante solar S_0 igual a 1367 W/m^2 . A radiação extraterrestre R_0 é dada pela Equação 2.2 de Duffie (1991). Para compensar a excentricidade orbital ε entre a Terra e o Sol ao longo do ano, aplica-se a expressão da Equação 2.1. A declinação solar δ é dada pela Equação 2.5. O ângulo de elevação solar α e o ângulo azimutal β são calculados a partir das Equações 2.3 e 2.4, respectivamente. Ao nascer e ao pôr do sol, o ângulo de elevação solar é igual a 0 (zero), desta forma, obtêm-se as Equações 2.6 e 2.7 para os ângulos horários do nascer e do pôr do Sol, h_{ns} e h_{ps} , respectivamente (Kumar, 1997). Uma vez calculado o ângulo horário do nascer e por do sol é apenas necessário definir qual o intervalo de tempo a considerar nos cálculos da radiação. É no entanto preciso ter em consideração que para utilizar a Equação 2.4, é necessário saber se o sol ocupa num determinado instante a metade norte ou sul do céu. Essa condição é estabelecida mediante o $\cos(h)$ ser maior (ou menor) do que $\tan(\delta) / \tan(\phi)$, variando entre -90° e 90° (ou 90° e 270°). Para o ângulo de incidência solar i , utiliza-se a Equação 2.8. Segundo Kumar (1997), vários fatores influenciam a quantidade da massa de ar M que o raio tem de atravessar até chegar à superfície, entre os quais se destacam para além da elevação solar α , a altitude z e a refração atmosférica. Quanto maior a altitude z , menor será a massa de ar que o raio terá de ultrapassar. No entanto, isso é significativo quando estão em causa as altitudes z das grandes cadeias montanhosas. A refração atmosférica toma um peso significativo para uma elevação solar α inferior a 30° . Desta forma, aplica-se a Equação 2.15, desenvolvida por Kreith (1978).

$$M = [1229 + (614 \sin \alpha)^2]^{1/2} - 614 \sin \alpha \quad (2.15)$$

A transmitância atmosférica τ_d varia de acordo com a massa de ar M . Segundo Gates (1980), a altas altitudes e com céu limpo obtêm-se valores na ordem dos 0.8, enquanto para céu limpo, mas com grande “congestionamento” de gases e poeiras podem-se ter valores tão baixos como 0.4. O *Shortwave* aplica a Equação 2.16, desenvolvida por Kreith (1978).

$$\tau_d = 0.56(e^{-0.65M} + e^{-0.095M}) \quad (2.16)$$

A radiação direta obtém-se pela Equação 2.14.

A Figura 2.8 apresenta um diagrama com o processo utilizado para calcular a radiação direta no *Shortwave*.

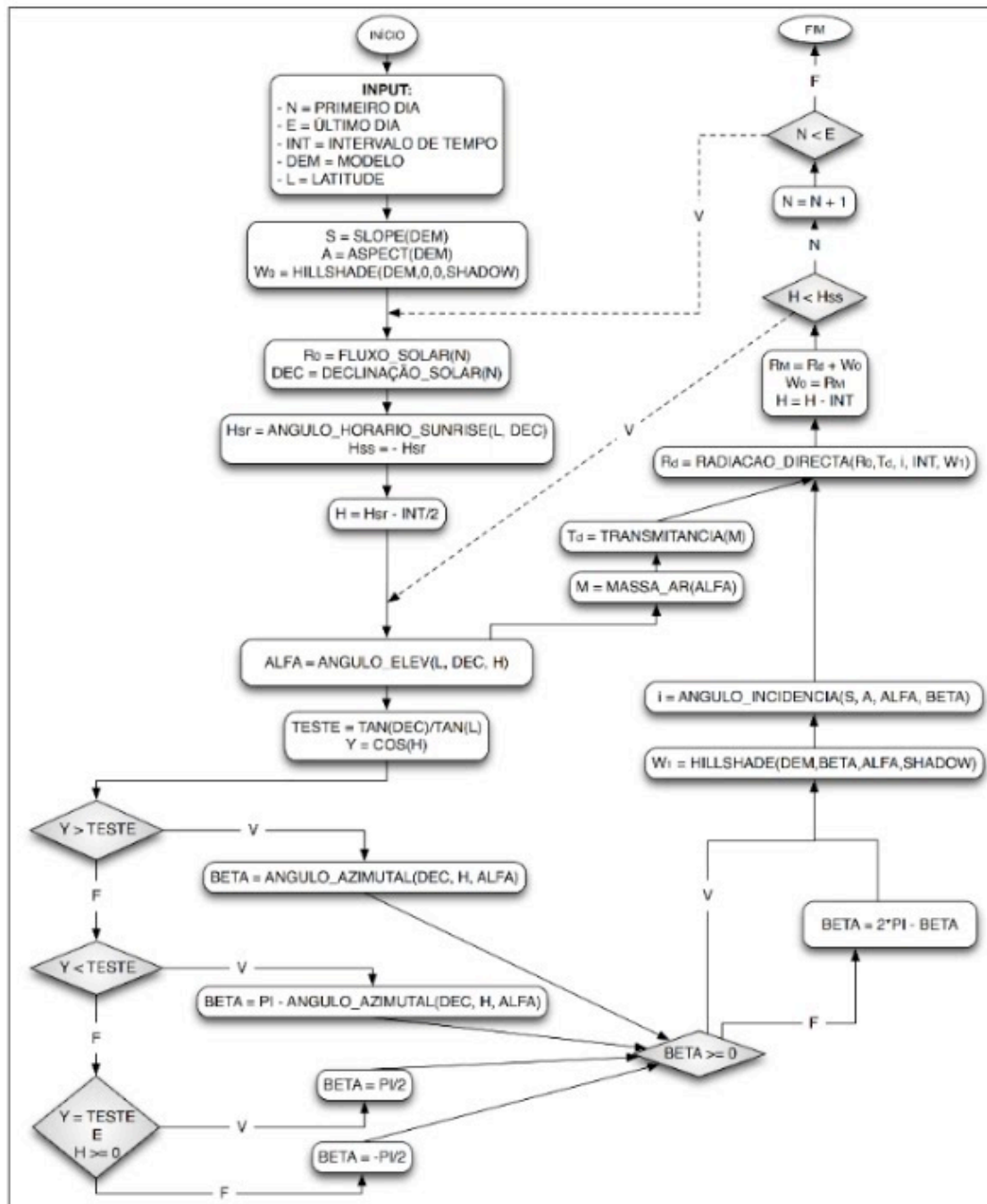


Figura 2.8 – Diagrama do Modelo de Radiação

2.2.1.2 Radiação difusa

Para a radiação difusa R_f , o *Shortwave* considera um factor de transmitância da radiação difusa τ_f que é função da transmitância atmosférica τ_d (Eq. 2.17) e calcula a radiação difusa com base nesse valor de transmitância e o declive do terreno S (Eq. 2.18).

$$\tau_f = 0.271 - 0.294\tau_d \quad (2.17)$$

$$R_f = R_0\tau_f \cos^2(S/2)\sin\alpha \quad (2.18)$$

2.2.1.3 Radiação refletida

A fator de transmitância da radiação refletida τ_r é calculado por (Eq. 2.19):

$$\tau_r = 0.271 + 0.706\tau_d \quad (2.19)$$

A radiação refletida R_r considera o *Albedo* r de acordo com os valores da Tabela 2.1 e é igual a (Eq. 2.20):

$$R_r = rR_0\tau_r \sin^2(S/2)\sin\alpha \quad (2.20)$$

2.2.2 Solar Analyst

O *Solar Analyst* foi desenvolvido por Fu e Rick (2000) e vem integrado no *Arcgis Desktop*. A forma como os autores abordam o facto de o modelo considerar as condições de céu limpo ou reais é pouco clara, pelo que se espera conseguir tirar algumas conclusões após utilizar o modelo. O *Solar Analyst* determina a posição do sol para todas as posições acima do horizonte e cada uma dessas posições são organizadas em pequenos sectores a que corresponde uma quantidade de radiação direta, denominando-se de *Sunmap*. Cada *Sunmap* pode conter a informação até um ano para cada ponto (pixel). O tamanho de cada um dos sectores pode ser definido pelo intervalo de tempo de cálculo considerado para o modelo (hora, dias). Para considerar as sombras, o *Solar Analyst* utiliza a função *Viewsbed* (Secção 2.1.15), que faz o levantamento das obstruções e procede da seguinte forma com o *Sunmap*:

- 1) *Overlay* com o *Sunmap* para determinar a radiação direta para um ponto da superfície (Fig. 2.9).



Figura 2.9 - *Overlay* do Sunmap com a vista hemisférica

Para a radiação difusa, o *Solar Analyst* cria para cada ponto à superfície um *Skymap*. Essa radiação é representada em pequenos sectores e cada *Skymap* pode ter a radiação até um ano. Tal como para a radiação direta procede-se da seguinte forma para considerar as obstruções:

- 2) *Overlay* com o *Skymap* para determinar a radiação difusa para um ponto da superfície (Fig. 2.10).

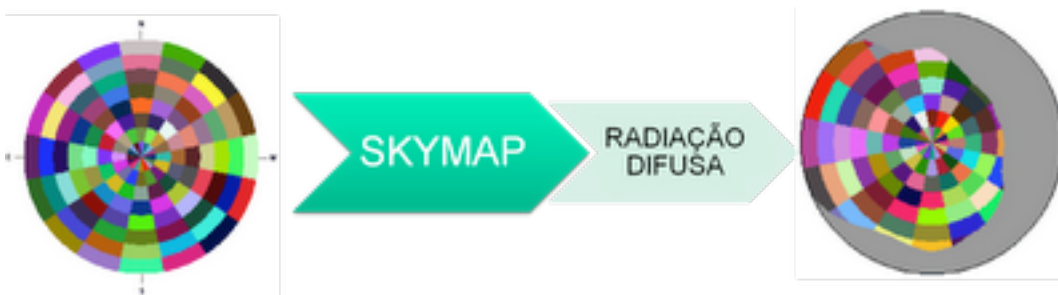


Figura 2.10 - *Overlay* do Skymap com a vista hemisférica

O *Solar Analyst* considera os seguintes dados de entrada:

- MDS
- Transmittivity τ (valor)
- Diffuse proportion τ_f (valor)
- *Albedo* r (valor ou raster)
- Primeiro dia
- Último dia
- Intervalo de tempo entre cálculo (Pode-se definir um valor horário e outro diário)

2.2.2.1 Radiação direta

A radiação extraterrestre R_0 é calculada usando a Equação 2.21:

$$R_0 = S_0 \quad (2.21)$$

Na descrição do modelo pelo autor (Fu, 2000), não há referência a uma fórmula para compensar a excentricidade da órbita da Terra ε . A radiação direta R_d é dada pela Equação 2.14. Onde τ_d tem a seguinte expressão (Eq. 2.22):

$$\tau_d = \tau^M \quad (2.22)$$

Nesta equação τ é um parâmetro específico do modelo para a transmitância atmosférica (diretamente introduzido no modelo). A massa de ar M depende da altitude do lugar e da elevação solar e é dada pela seguinte expressão (Eq. 2.23):

$$M = \frac{e^{-0.000118z - 1.638 \times 10^{-9}z^2}}{\cos \left[\frac{\pi}{2} - \alpha \right]} \quad (2.23)$$

O autor também não revela a expressão utilizada para a elevação solar α e o ângulo azimutal β . No entanto, não existem muitas alternativas para o seu cálculo. São parâmetros baseados em fórmulas astronómicas, pelo que provavelmente serão utilizadas as fórmulas descritas no modelo teórico (Secção 2.1.4).

2.2.2.2 Radiação difusa

A radiação difusa R_f é calculada da seguinte forma (Eq. 2.24):

$$R_f = \frac{R_0 \sum \tau_d}{1 - \tau_f} \tau_f \cos i \cdot \psi \quad (2.24)$$

Onde τ_f é o factor de transmitância da radiação difusa e é introduzido como parâmetro de entrada no modelo. Segundo Fu (2000), τ_f é a quantidade de radiação global que é

difusa, isto é $\frac{D}{G}$. O peso ψ é a proporção de radiação difusa obtida por cada sector em relação a todos os sectores (Eq. 2.25).

$$\psi = \frac{\cos \left[\frac{\pi}{2} - \alpha_2 \right] - \cos \left[\frac{\pi}{2} - \alpha_1 \right]}{Div_{\beta}} \quad (2.25)$$

Onde α_1 e α_2 são os ângulos dos limites de cada sector (cada retângulo representado na Figura 2.10) e Div_{β} é o número de divisões azimutais no *Skymap*.

2.2.3 R.Sun

Este modelo foi inicialmente desenvolvido por Hoffierka (2002) com o intuito de se aplicar na Europa, isto porque as equações empíricas utilizadas por este modelo, baseiam-se em experimentações feitas na Europa. O *R.Sun* permite calcular diretamente as condições atmosféricas reais, introduzindo como parâmetro de entrada um *Clear-sky index*. Para calcular o efeito das sombras, o *R.Sun* utiliza uma função *Hillsshade* (Secção 2.1.15).

O *R.Sun* é um modelo mais complexo que os anteriores e que considera os seguintes dados de entrada:

- MDS
- Orientação do terreno (Obtido pelo MDS)
- Declive do terreno (Obtido pelo MDS)
- Factor de Linke TLK(valor ou raster)
- Albedo (valor ou raster)
- Clear-sky index para a radiação direta (valor ou raster)
- Clear-sky index para a radiação difusa (valor ou raster)
- Primeiro dia
- Último dia
- Intervalo de tempo entre cálculos

2.2.3.1 Radiação direta

A radiação extraterrestre R_0 é dada pela Equação 2.2. O factor de correção da órbita ε é dado por (Eq. 2.26):

$$\varepsilon = 1 + 0.03344 \cos \left[2\pi \frac{N}{365.25} - 0.048869 \right] \quad (2.26)$$

Onde N varia de 1 a 365. Esta fórmula apresenta algumas diferenças em relação à fórmula utilizada no modelo teórico (Eq. 2.1).

A declinação solar δ também é dada por uma expressão diferente da Equação 2.5. É calculada através da Equação 2.27:

$$\delta = \text{asin} \left[0.3978 \sin \left(2\pi \frac{N}{365.25} - 1.4 + 0.0355 \sin \left(2\pi \frac{N}{365.25} - 0.0489 \right) \right) \right] \quad (2.27)$$

A transmitância atmosférica τ_d é igual a (Eq. 2.28):

$$\tau_d = e^{-0.8662 \cdot T_{LK} \cdot M \cdot S_R(M)} \quad (2.28)$$

Sendo T_{LK} o factor de *Linke*. A massa de ar M depende da elevação solar α e da altitude z , isto é (Eq. 2.29):

$$M = \frac{e^{(-z/8434.5)}}{\sin \alpha^r + 0.50572(\alpha^r + 6.07995)^{-1.6364}} \quad (2.29)$$

A elevação solar α é dada pela fórmula clássica da trigonometria esférica (Eq. 2.3). Após determinar α , o *R.Sun* procede à correção da refração atmosférica, que é feita recorrendo às Equações 2.30 e 2.31:

$$\Delta \alpha^r = \frac{0.061359(0.1594 + 1.123 \alpha + 0.065656 \alpha^2)}{1 + 28.9344 \alpha + 277.3971 \alpha^2} \quad (2.30)$$

$$\alpha^r = \alpha + \Delta \alpha^r \quad (2.31)$$

Para determinar o ângulo horário ao nascer e pôr do sol é usada a Equação 2.32:

$$\cos(h_{ns} - \lambda') = \frac{-\sin \phi' \sin \delta}{\cos \phi' \cos \delta} \quad (2.32)$$

onde ϕ' e λ' , obtêm-se a partir das Equações 2.33 e 2.34:

$$\sin \phi' = -\cos \phi \sin S \cos A + \sin \phi \cos S \quad (2.33)$$

$$\tan \lambda' = \frac{-\sin S \sin A}{\sin \phi \sin S \cos A + \cos \phi \cos S} \quad (2.34)$$

Para o *R.Sun*, a dispersão de *Rayleigh* $S_R(M)$ é determinada a partir das Equação 2.35:

$$\left\{ \begin{array}{ll} S_R(M) = \frac{1}{6.6296 + 1.7513M - 0.1202M^2 + 0.0065M^3 - 0.00013M^4} & \text{se } M \leq 20 \\ S_R(M) = \frac{1}{10.4 + 0.718M} & \text{se } M > 20 \end{array} \right. \quad (2.35)$$

A posição do sol relativamente a uma superfície inclinada i é definida por (Eq. 2.36):

$$\sin i = \cos \phi' \cos \delta \cos(h - \lambda') + \sin \phi' \sin \delta \quad (2.36)$$

e a radiação direta é dada por (Eq. 2.37):

$$R_d = R_0 \tau_d \sin i \quad (2.37)$$

2.2.3.2 Radiação difusa

A radiação difusa na superfície horizontal é dada por (Eq. 2.38):

$$R_{fh} = R_0 \tau_f F(\alpha) \quad (2.38)$$

O factor de transmitância da radiação difusa é calculado usando a Equação 2.39:

$$\tau_f = -0.015843 + 0.030543 T_{LK} + 0.0003797 T_{LK}^2 \quad (2.39)$$

A função da elevação solar para a radiação difusa $F(\alpha)$ é dada pela Equação 2.40:

$$F(\alpha) = A_1 + A_2 \sin \alpha + A_3 \sin^2 \alpha \quad (2.40)$$

Tal que A_2 e A_3 são iguais a (Eqs. 2.41 e 2.42):

$$A_2 = 2.04020 + 0.018945 T_{LK} - 0.011161 T_{LK}^2 \quad (2.41)$$

$$A_3 = -1.3025 + 0.039231 T_{LK} + 0.0085079 T_{LK}^2 \quad (2.42)$$

Para A_1 segue-se a seguinte condição (Eq. 2.43):

$$\begin{cases} A_1 = 0.26463 - 0.061581 T_{LK} + 0.0031408 T_{LK}^2 & \text{se } A_1 \tau_f \geq 0.0022 \\ A_1 = 0.0022 / \tau_f & \text{se } A_1 \tau_f < 0.0022 \end{cases} \quad (2.43)$$

Para a superfície inclinada e exposta à luz do Sol, a radiação difusa R_f é calculada usando a Equação 2.44:

$$\begin{cases} R_f = R_{fh} [F(S)(1 - K_d) + K_d \sin i / \sin \alpha] & \text{se } \alpha \geq 0.1 \\ R_f = R_{fh} \cdot [F(S)(1 - K_d) + K_d \sin S \cos A_{LN} / (0.1 - 0.008 \alpha)] & \text{se } \alpha < 0.1 \end{cases} \quad (2.44)$$

A_{LN} é obtido de acordo com as seguintes condições (Eq. 2.45)

$$\begin{cases} A_{LN} = \beta - A & \text{se } -\pi \leq \beta - A \leq \pi \\ A_{LN} = \beta - A - 2\pi & \text{se } \beta - A > \pi \\ A_{LN} = \beta - A + 2\pi & \text{se } \beta - A < -\pi \end{cases} \quad (2.45)$$

Para uma superfície inclinada e em sombra a radiação difusa R_f é igual a (Eq. 2.46):

$$R_f = R_{fh} F(S) \quad (2.46)$$

Sendo $F(S)$ é uma função para a radiação difusa que considera o declive do terreno S (Eq. 2.47):

$$F(S) = \frac{1 + \cos S}{2} + [\sin S - S \cos S - \pi \sin^2(S/2)]W \quad (2.47)$$

O valor de W é para uma superfície em sombra igual a 0.25227. Para uma superfície iluminada sob condições de céu limpo é igual a (Eq. 2.48):

$$W = 0.00263 - 0.712 K_d - 0.6883 K_d^2 \quad (2.48)$$

K_d é a quantidade de radiação direta disponível (razão entre a radiação direta e a radiação global fora da atmosfera na superfície horizontal) (Eq. 2.49):

$$K_d = \frac{Rd_h}{R_{0h}} = \frac{R_0 \tau_d \sin \alpha}{R_0 \sin \alpha} = \tau_d \quad (2.49)$$

2.2.3.3 Radiação refletida

A radiação reflectida R_r é igual a (Eq. 2.50):

$$R_r = r [R_0 \tau_d \sin \alpha + R_0 \tau_f F(\alpha)] \frac{1 - \cos S}{2} \quad (2.50)$$

Onde r é o *Albedo*

2.2.4 Características gerais dos modelos

Os modelos estudados nesta dissertação apresentam as seguintes características gerais (Tabela 2.2):

Características	Shortwave	Solar Analyst	R.Sun
Quantifica a variação espaço-temporal da radiação solar	X (kJ/m ² /período)	X (Wh/m ² /período)	X (Wh/m ² /dia)
Plataforma onde está disponível	ArcGIS Worstation	ArcGIS Desktop 10	GRASS GIS
Considera as condições atmosféricas ideais (céu limpo)	X	X	
Considera as condições atmosféricas reais			X
Radiação direta	X	X	X
Radiação difusa	X	X	X
Radiação refletida	X		X
Calcula o efeito das sombras	Hillshade	Viewshed	Hillshade
Parâmetro específico		τ	T _{LK}

Tabela 2.2 – Características gerais dos modelos

3 METODOLOGIA

3.1 Análise analítica dos modelos

Para entender as diferenças entre os modelos considerados nesta dissertação (*Shortwave*, *Solar Analyst* e *R.Sun*) é necessário realizar uma análise dos parâmetros utilizados em cada um, a fim de entender a sua influência no resultado final.

Segundo os autores que desenvolveram os diferentes modelos, a transmitância atmosférica τ_d é apresentada como sendo o parâmetro que tem maiores implicações e importância nos resultados obtidos para a radiação direta. A transmitância atmosférica é calculada em função da massa de ar M e é calculada em função do ângulo de elevação solar α . Apenas o *Shortwave* depende somente destes parâmetros (Secção 2.2.1). O *Solar Analyst* depende ainda de um parâmetro específico τ , denominado de “*transmittivity*” e que é um dado de entrada (Secção 2.2.2), e o *R.Sun* considera um T_{LK} (Factor de *Linké*) (Secção 2.2.3). O primeiro passo para analisar as diferenças entre os modelos passa por comparar a variação da transmitância atmosférica τ_d entre os mesmos, tendo em conta os parâmetros específicos considerados por alguns deles. Deste modo, para um mesmo valor do ângulo de elevação solar, pretende-se:

- Determinar eventuais discrepâncias nos valores obtidos para as várias massas de ar M , representando graficamente todas as fórmulas. Caso não exista coesão nas funções da massa de ar, encontrar o motivo dessas diferenças.
- Medir o impacto que os parâmetros τ e T_{LK} têm no cálculo da transmitância atmosférica τ_d . Estabelecer um valor para esses parâmetros de modo que a transmitância atmosférica seja o mais similar possível entre os diferentes modelos. Concluir se é possível atribuir um valor a esses parâmetros que permita obter os mesmos valores de radiação direta entre os modelos.

3.2 Avaliação comparativa dos modelos

Com base nos parâmetros definidos na Secção 3.1, considerar um pequeno plano horizontal localizado onde se encontra a estação meteorológica de Coimbra e calcular as componentes da radiação direta e difusa nesse plano para cada um dos modelos e ao

longo de todos os meses do ano. O período mensal é o intervalo de tempo a considerar entre medições, uma vez que permite fazer uma boa análise e comparação dos resultados com uma quantidade equilibrada de dados.

3.2.1 Conversão de unidades

Nesta dissertação, as unidades a utilizar para a radiação solar serão o $\text{Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.

- **Shortwave**

O *Shortwave* fornece os resultados em $\text{kJ.m}^{-2}.\text{período}^{-1}$.

Portanto, para obter os resultados em $\text{Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ será necessário aplicar a seguinte correção (Eq. 3.1):

$$\text{Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1} = \frac{\text{kJ.m}^{-2}.\text{período}^{-1} \times 1000}{3600 \times (\text{Último dia} - \text{Primeiro dia} + 1)} \quad (3.1)$$

- **Solar Analyst**

O *Solar Analyst* fornece a soma dos valores para o período definido. Para obter o valor diário aplica-se a seguinte expressão (Eq. 3.2):

$$\text{Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1} = \frac{\text{Wh.m}^{-2}.\text{período}^{-1}}{\text{Último dia} - \text{Primeiro dia} + 1} \quad (3.2)$$

- **R.Sun**

O R.Sun fornece o resultado em $\text{Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.

3.2.2 Radiação direta

Neste ponto pretende-se identificar eventuais diferenças nos resultados obtidos para os modelos na componente da radiação direta. Verificar se o valor da transmitância equivalente (estabelecida no ponto 3.1) confirma a obtenção de valores idênticos entre os modelos.

3.2.3 Radiação difusa

A radiação difusa é abordada pelos diferentes autores de formas bastante variadas. Como as expressões não apresentam uma forma que as permita comparar diretamente, vai proceder-se somente à comparar graficamente dos resultados obtidos pelos modelos.

3.2.4 Radiação refletida

Apenas dois dos três modelos considerados neste estudo consideram a radiação refletida, o *Shortwave* e o *R.Sun*. De acordo com a literatura, a radiação refletida apresenta uma ordem de grandeza muito inferior à das outras componentes da radiação. A radiação refletida será analisada na Secção 3.6.3 para um edifícios simples. Portanto, vão correr-se os modelos para esta componente para um período a definir e irá analisar-se se há necessidade de dar relevância a esta componente ou não.

3.3 Comparação dos modelos com os dados da estação meteorológica

Para aprofundar o estudo sobre os modelos, procedeu-se à comparação dos resultados obtidos com os dados fornecidos pela Estação Meteorológica de Coimbra. A estação meteorológica tem informação relativa à radiação direta, à radiação difusa e um fator de nebulosidade que pode ser convertido para *Clear-sky index* (Eq. 3.5). O *Clear-sky index* pode ser utilizado como parâmetro de entrada no modelo *R.Sun* e pode ser aplicado *à posteriori* no *Shortwave* e no *Solar Analyst*. Desta forma, pode calcular-se a radiação solar através de cada um dos modelos para as condições de céu reais, fazendo com que cada um possa ser comparado diretamente com os valores de radiação solar fornecidos pela estação meteorológica.

3.3.1 Conversão de unidades

A estação meteorológica fornece os valores de radiação em cal.cm^{-2} . Para converter para $\text{Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ aplica-se a seguinte relação (Eq. 3.3):

$$1 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1} = 0.08598 \text{ cal.cm}^{-2} \quad (3.3)$$

Também apenas disponibiliza os valores da radiação global e radiação difusa. Desta forma, a radiação direta calcula-se a partir da Equação 3.4:

$$R_d = R_g - R_f \quad (3.4)$$

Para converter o factor de nebulosidade para *Clear-sky index* utiliza-se a Equação 3.5. Os valores obtidos para os vários meses do ano estão indicados na Tabela 3.1. A última coluna apresenta o valor médio anual. O factor de nebulosidade disponibilizado é a média para o período de 1971-2000.

$$ClearSky\ Index = 1 - \frac{Nebulosidade}{10} \quad (3.5)$$

Estação Meteorológica	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	ANO
Nebulosidade (0-10)	5	6	5	6	6	5	4	4	5	6	6	6	5
Clear-sky index	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,47

Tabela 3.1 - Valores de nebulosidade e *Clear-sky index* médios para Coimbra (1971-2000)

3.3.2 Radiação direta

- Comparar os valores obtidos para a radiação direta pelos modelos e os valores disponibilizados pela estação meteorológica, utilizando o *Clear-sky index* da estação (Tab. 3.1) nos modelos.
- Analisar a influência de utilizar um T_{LK} variável no modelo *R.Sun*. Os valores da Tabela 3.2 representam os valores de T_{LK} obtidos para a cidade de Coimbra através do *SoDa Web Service*.

Estação Meteorológica	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	ANO
T_{LK}	2,5	2,7	2,9	3	3,5	3,4	3,6	3,2	3,3	3,1	2,6	2,4	3

Tabela 3.2 - Valores de T_{LK} para Coimbra

3.3.3 Radiação difusa

Comparar os valores obtidos para a radiação difusa pelos modelos e os valores disponibilizados pela estação meteorológica.

3.4 Análise dos dados fornecidos pelo PVGIS

3.4.1 Comparação com os dados da estação meteorológica

Para ver até que ponto os dados da estação meteorológica estão de acordo com os dados do PVGIS é necessário fazer uma comparação das diferentes componentes da radiação solar para uma superfície horizontal. Se os valores forem comparáveis serão os dados fornecidos pelo PVGIS que serão usados como referência para comparar com os resultados obtidos pelos modelos para a cobertura (inclinada) de um edifício (Secção 3.6), uma vez que o PVGIS fornece dados de radiação solar para superfícies inclinadas.

O PVGIS apenas fornece a radiação global e $\frac{D}{G}$, pelo que se pode obter, separadamente, a radiação direta e difusa, utilizando as seguintes expressões (Eqs. 3.6 e 3.7):

$$R_f = R_g \frac{D}{G} \quad (3.6)$$

$$R_d = R_g - R_f \quad (3.7)$$

3.4.2 Variação da radiação solar para diferentes inclinações

Será ainda interessante avaliar a variação da radiação solar (no PVGIS) tendo em conta as inclinações de 25° viradas a norte e também de 25° viradas a sul, ao longo dos meses do ano. Foram escolhidas as inclinações de 25°, porque representam a inclinação média das águas de um telhado. Este ponto pode reforçar a importância de utilizar um modelo matemático para simular a radiação solar, uma vez que diferentes inclinações podem influenciar significativamente a quantidade de radiação solar que as atinge e só um modelo matemático que simule a radiação solar com um MDS tem capacidade e sensibilidade para juntar toda a complexidade urbana (inclinações, exposições, sombras e elevações dos objetos) e reproduzir um mapa detalhado com toda essa informação.

3.5 Parametrização do *Clear-sky index* para a cidade de Coimbra

- Estabelecer um *Clear-sky index* mensal para Coimbra que se ajuste a cada um dos modelos. Terá de se estimar um para a radiação direta k_d^c e outro para a radiação difusa k_f^c . Os *Clear-sky index* são obtidos através da mediação da radiação solar numa superfície horizontal e podem ser calculados através da razão entre os valores de radiação reais medidos pela estação meteorológica ou fornecidos pelo PVGIS e os resultados obtidos pelo modelo (Eqs. 3.8 e 3.9):

$$k_d^c = \frac{R_{d(r)}}{R_{d(m)}} \quad (3.8)$$

Onde $R_{d(r)}$ é o valor da radiação direta real e $R_{d(m)}$ é o valor da radiação direta obtida pelo modelo.

$$k_f^c = \frac{R_{f(r)}}{R_{f(m)}} \quad (3.9)$$

Onde $R_{f(r)}$ é o valor da radiação difusa real e $R_{f(m)}$ é o valor da radiação difusa obtida pelo modelo.

Uma vez estimado o *Clear-sky index* podemos utilizá-lo para o cálculo da radiação solar em condições reais numa superfície complexa, tal como será feito na Secção 3.6 para um edifício simples localizado na estação meteorológica de Coimbra e para a cidade de Coimbra na Secção 3.7.

A partir do cálculo da radiação direta e difusa realizada pelos modelos (para as condições de céu limpo), basta aplicar as Equações 3.10 e 3.11 com o *Clear-sky index* estimado para o modelo em questão para obter a radiação solar para as condições de céu reais:

$$R_d^c = R_{d(m)} \cdot k_d^c \quad (3.10)$$

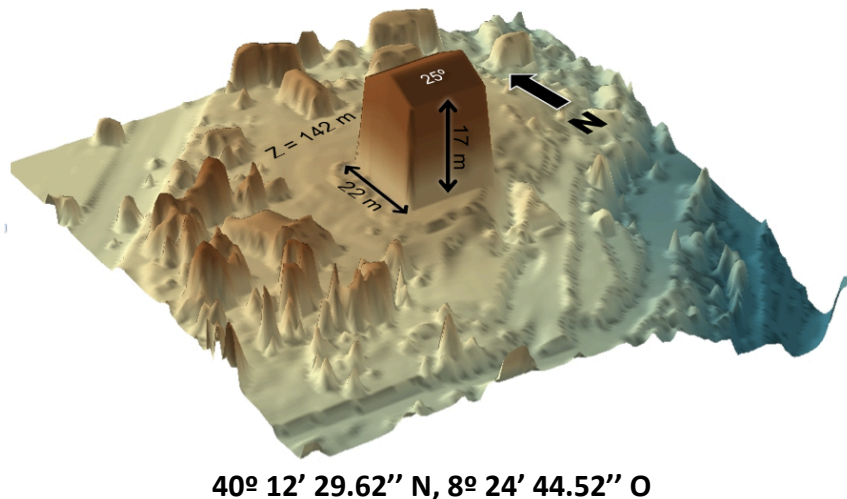
$$R_f^c = R_{f(m)} \cdot k_f^c \quad (3.11)$$

Para o *R.Sun*, o *Clear-sky index* estimado pode ser diretamente introduzido antes de correr o modelo, não sendo necessário utilizar estas equações.

- Estudo de uma eventual correlação entre os valores de *Clear-sky index* obtidos para cada modelo para a radiação direta e a quantidade de radiação difusa $\frac{D}{G}$ disponibilizada pela estação meteorológica ou pelo PVGIS. Se existir uma forte correlação, os valores de $\frac{D}{G}$ podem servir para uma estimação do *Clear-sky index* para a cidade de Coimbra.

3.6 Cálculo e análise comparativa da radiação solar para um edifício

Para avaliar o comportamento de cada modelo em relação à radiação solar em superfícies inclinadas, considerou-se um edifício com uma das águas do telhado virada a norte e outra a sul com uma inclinação de 25° e localizado no local onde se encontra instalada a estação meteorológica de Coimbra (Fig. 3.1).



40° 12' 29.62'' N, 8° 24' 44.52'' O
 Figura 3.1 - Edifício localizado no lugar da estação meteorológica de Coimbra

3.6.1 Radiação direta

1. Cálculo da radiação direta através de cada um dos modelos, aplicando o *Clear-sky* estimado (pelo PVGIS ou pela estação meteorológica) no ponto 3.5 da metodologia;
2. Extração dos valores mensais obtidos para cada água do edifício;
3. Obtenção dos valores para a radiação direta no local do edifício através do PVGIS para um declive de 25° virado a norte e 25° virado a sul;
4. Comparação dos gráficos dos resultados obtidos

3.6.2 Radiação difusa

Processo análogo ao realizado para a componente da radiação direta, mas para a componente da radiação difusa.

3.6.3 Radiação refletida

A radiação refletida será calculada para o edifício através do *Shortwave* e do *R.Sun*. Pretende-se verificar se esta componente apresenta valores que justifiquem um estudo mais aprofundado. Fazer a comparação dos resultados obtidos para cada um dos modelos.

3.6.4 Radiação global

Neste ponto vão somar-se os resultados que foram obtidos pela radiação direta e pela radiação difusa através dos modelos, para obter os valores de radiação global para o edifício e assim depois compará-los com os dados do PVGIS para os declives de 25° virado a norte e 25° virado a sul.

3.7 Mapa de radiação solar da cidade de Coimbra

Para produzir o mapa de radiação da cidade de Coimbra iremos seguir os seguintes passos:

1. A escolha do modelo

Escolher o modelo mais capaz de representar as condições reais em Coimbra.

2. Definir os dados de entrada

- MDS
 - Resolução espacial de 1 metro. Cobre uma área de 1740 m x 845 m no centro de Coimbra, onde se inclui a Universidade, a alta e a baixa da cidade (Fig. 3.2).
- Período de 1 ano
- Intervalo incremental de 1 hora
- *Clear-sky index*

3. Calcular o tempo de processamento

4. Obter os mapas de radiação para as diferentes componentes

5. Aplicar o *Clear-sky index*

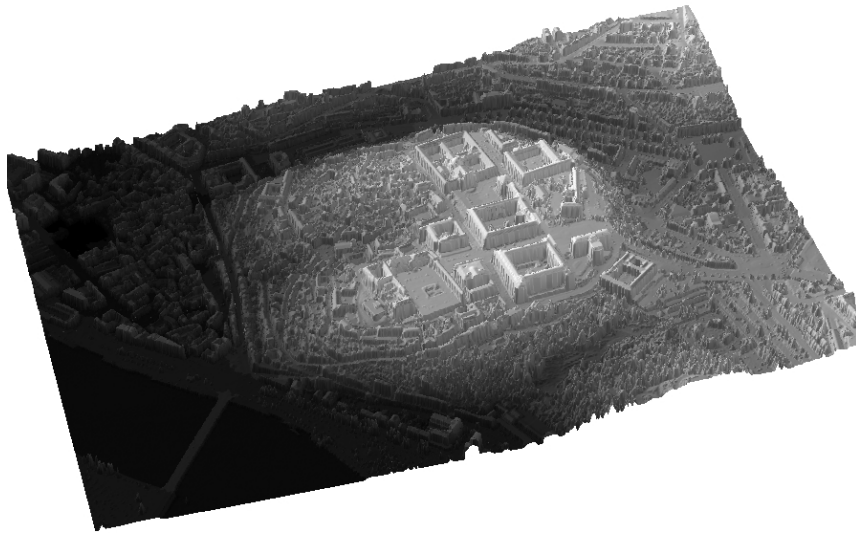


Figura 3.2 – MDS da Cidade de Coimbra (3D)

3.8 Mapa do potencial energético das coberturas dos edifícios de Coimbra

Para realizar o estudo do potencial energético solar consideraram-se alguns edifícios da Universidade de Coimbra, tal como mostra na Figura 3.3.

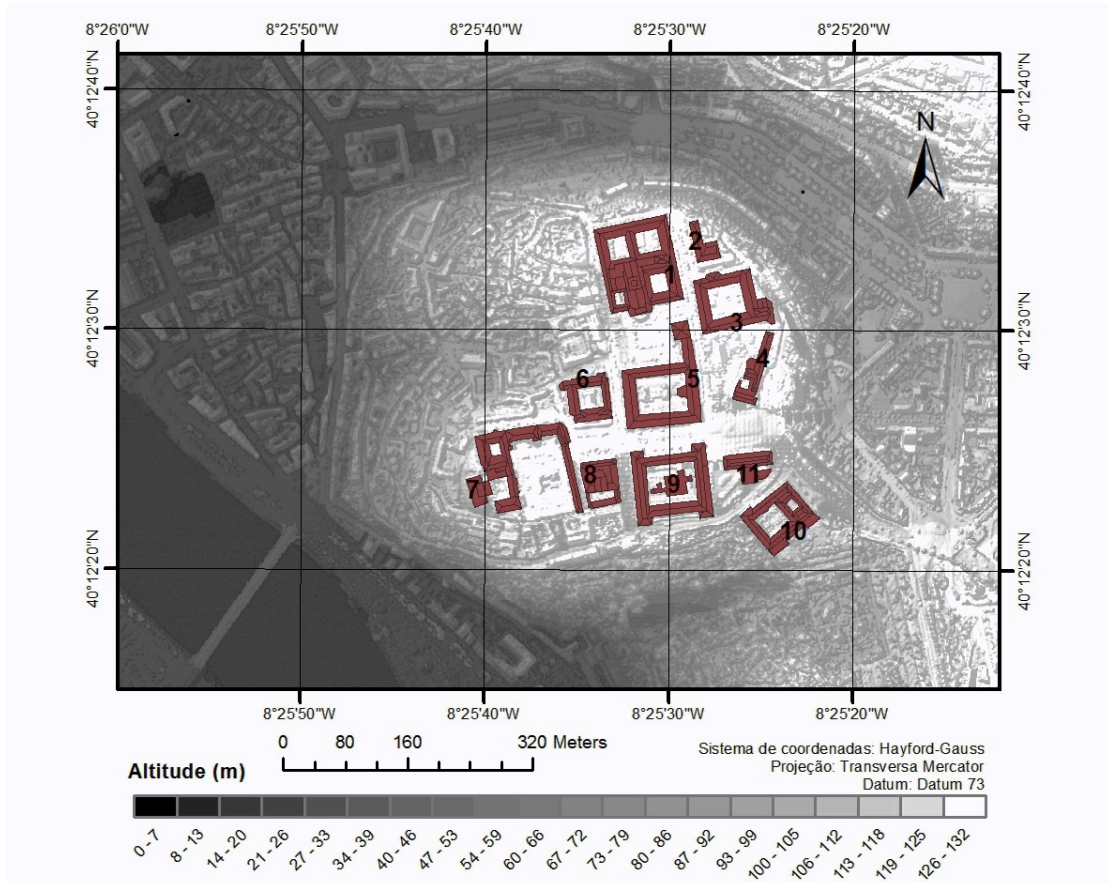


Figura 3.3 – Edifícios da Universidade de Coimbra e o MDS da área envolvente (2D)

Os números apresentados na Figura 3.3 representam:

- 1 – Sé Nova / Departamento de Ciências da Terra
- 2 – Laboratório Químico
- 3 – Departamento de Bioquímica
- 4 – Relações Internacionais
- 5 – Faculdade de Medicina
- 6 – Faculdade de Letras
- 7 – Faculdade de Direito
- 8 – Biblioteca geral
- 9 – Departamentos de Física e Química
- 10 – Departamento de Biologia
- 11 – Departamento de Matemática

O estudo do potencial das coberturas implica considerar o cruzamento de duas fontes de informação:

- Mapa de radiação solar global
- Mapa das áreas reais

Estes dois mapas representam o potencial. O mapa de radiação solar é obtido através dos passos da Secção 3.7 e fornece os níveis de radiação por metro quadrado. O mapa com as áreas reais fornece a área real ocupada por cada pixel, desta forma somando os pixéis correspondentes a cada água de telhado, obtém-se a sua área real. Para obter o mapa das áreas reais das coberturas procede-se da seguinte forma (Jenness, 2010):

- Identifica-se o tamanho do pixel c
- Através do mapa de declive S aplica-se a Equação 3.12 e obtém-se o mapa das áreas reais:

$$Surface Area = \frac{c^2}{\cos S} \quad (3.12)$$

- Do resultado obtido, somam-se os valores dos pixéis para cada água de telhado recorrendo à cartografia existente para esses edifícios. Para evitar que sejam utilizados os pixéis que dizem respeito às fachadas e que representam áreas no mapa de áreas reais muito grandes, é necessário removê-los antes realizar a soma.

Através do produto dos dois mapas e considerando uma percentagem de eficiência do sistema PV, obtém-se o mapa do potencial energético solar para cada água de telhado dos edifícios considerados.

O diagrama seguinte, construído no *ModelBuilder* do *Arçgis*, mostra todo o procedimento até chegar ao mapa final do potencial energético solar (Fig. 3.4):

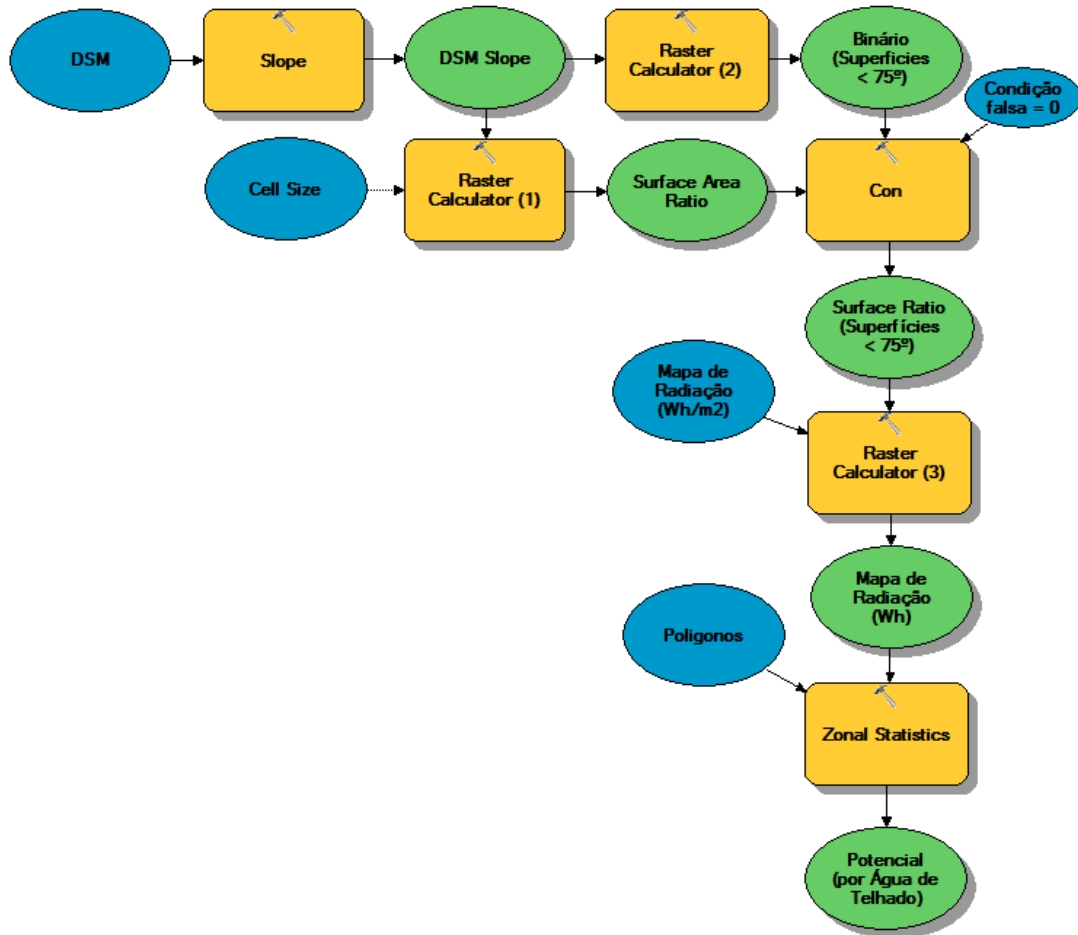


Figura 3.4 - Diagrama para obtenção do mapa de potencial energético solar

Começa-se por calcular o mapa de inclinação S do MDS [Slope], com o tamanho do pixel do MDS (Cell Size) e obtém-se o mapa do *Surface Area Raster* através da equação 3.12 [Raster Calculator (1)]. No *Surface Area Raster* os valores dos pixéis nos limites das águas dos edifícios serão consideravelmente grandes em relação aos seus vizinhos, uma vez que representam as fachadas dos edifícios. Estes valores não serão importantes para a análise e até podem influenciar negativamente os resultados seguintes, portanto, serão excluídos através do mapa binário criado através do MDS Slope [Raster Calculator (2)],

considerando apenas os ângulos inferiores a 75°. A esse *raster* binário estabelece-se a condição [Con] de definir todos os ângulos inferiores a 75° como sendo iguais aos do *Surface Area Raster* e os ângulos superiores iguais a 0. Para determinar o potencial solar, Strzalka (2010) propõe a seguinte expressão (Eq. 3.13):

$$Y = \eta \times A \times R_g \times f \quad (3.13)$$

Onde η é o fator de eficiência do sistema PV (a considerar 12% de rendimento), A é a área da cobertura ou de cada água do telhado, R_g é a radiação global e f é o fator de correção da inclinação e exposição do sistema PV, que acaba por não ser necessário considerar, porque o modelo já tem em consideração esses parâmetros. Portanto, multiplica-se o Mapa de Radiação Global R_g com o *Surface Area Raster* A [Raster Calculator (3)], considerando ainda um fator de eficiência η e obtêm-se os níveis de radiação solar por pixel. Para determinar o potencial que poderá ser gerado por cada cobertura ou água do telhado, basta delimitar essa área (edifícios em formato vetorial – Figura 3.3) e somar os valores dos pixels que se encontram no seu interior [Zonal Statistics].

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise analítica dos modelos

A variação da massa de ar M em função da elevação solar α é apresentada para cada um dos modelos na Figura 4.1. O *Solar Analyst* e o *R.Sun* consideram ainda a altitude z , pelo que se considerou esta ser igual a 142 m, uma vez que é a altitude onde se encontra instalada a estação meteorológica de Coimbra (com as coordenadas geográficas: 40° 12' 29.62" N, 8° 24' 44.52" O).

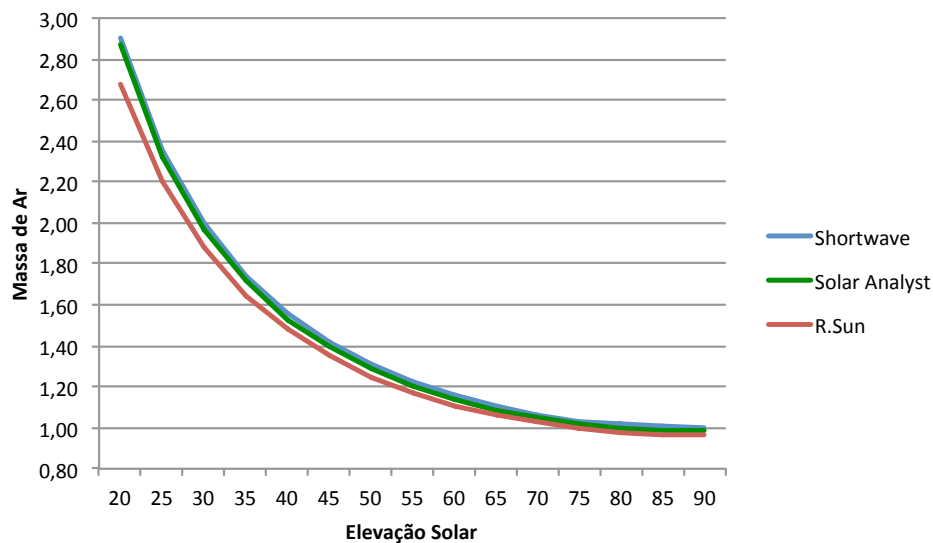


Figura 4.1– Variação da massa de ar em função da elevação solar

Apesar dos modelos apresentarem fórmulas aparentemente distintas (Eqs. 2.13, 2.21 e 2.27), os seus resultados foram semelhantes. A altitude z considerada pelo *Solar Analyst* e o *R.Sun* acaba por não refletir grandes diferenças em relação ao *Shortwave*. Esse resultado pode ser justificado, na medida em que a Estação Meteorológica se encontra a uma altitude de 142 metros, que é uma altitude não muito elevada e quase insignificante quando comparada com a quantidade de massa de ar M que o raio solar tem de atravessar. No entanto, o *R.Sun* acaba por apresentar o resultado mais distante dos demais, nomeadamente à medida que se o Sol se vai aproximando do horizonte. Na descrição das fórmulas utilizadas pelos modelos, apenas o *R.Sun* menciona a refração atmosférica. A refração atmosférica é maior quando o sol se encontra mais perto do horizonte, fazendo com que o sol aparente uma elevação solar maior do que aquela que realmente tem, logo uma existirá uma quantidade de massa de ar a atravessar menor para o *R.Sun*. e maior para o *Solar Analyst* e *Shortave*.

Uma primeira análise da fórmula utilizada para calcular a radiação direta (Eq. 2.13) indicia que a transmitância atmosférica τ_d é o principal fator a condicionar a quantidade de radiação direta que chega à superfície. Desta forma, tentou estabelecer-se os valores de transmitância atmosférica τ_d que pudessem ser mais idênticos, visto não poderem ser iguais, tendo em consideração as condições impostas pelos modelos que usam fórmulas diferentes. Um vez que o *Shortwave* apresenta a expressão para a transmitância atmosférica τ_d mais simples que apenas depende de M (Eq. 2.16), utilizou-se esta para comparar com as transmitâncias dos outros modelos. O *Solar Analyst* depende também de um parâmetro específico τ . Pela diferença entre as transmitâncias do *Shortwave* e do *Solar Analyst* obtiveram-se os resultados indicados na Figura 4.2. Foram utilizados três valores diferentes para o parâmetro específico τ do *Solar Analyst*, 0,78, 0,79 e 0,8.

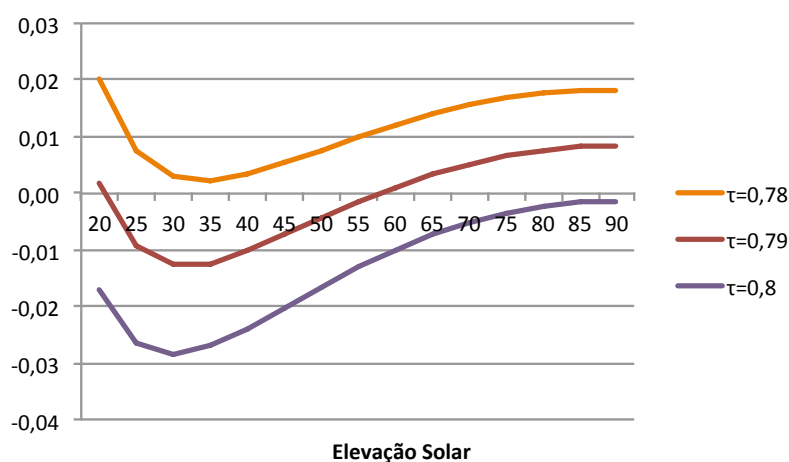


Figura 4.2 – Diferença entre a transmitância atmosférica calculada pelos *Shortwave* e o *Solar Analyst*

O valor de τ que parece aproximar mais as transmitâncias calculadas pelos dois modelos é $\tau = 0,79$. Na comparação do *Shortwave* com o *R.Sun*, as diferenças estão apresentadas na Figura 4.3. O *R.Sun* utiliza o fator de Linke, T_{LK} . Foram utilizados os seguintes valores para T_{LK} , 2, 2,5 e 3 a fim de escolher o valor de T_{LK} que apresentasse a menor diferença entre as transmitâncias destes dois modelos. Para Coimbra o valor médio anual para T_{LK} é 3 (Tabela 3.2).

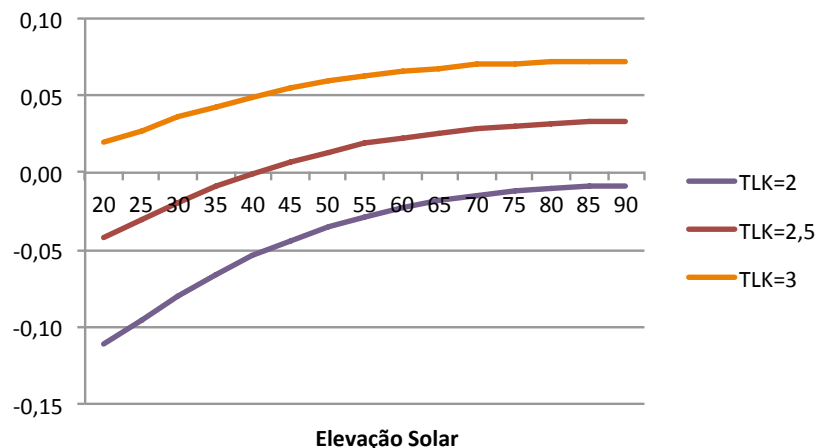


Figura 4.3 - Diferença entre a transmitância atmosférica calculada pelo *Shortwave* e o *R.Sun*

Nesta situação torna-se difícil escolher o valor de T_{LK} que aproxime de forma precisa as transmitâncias atmosféricas τ_d . Ao longo do ano a elevação solar máxima em Portugal não ultrapassa os 80° e dá-se no dia 21 de Junho, chegando a atingir apenas a elevação solar máxima de 30° a 21 de Dezembro. Apesar de o valor médio de T_{LK} para Coimbra ser 3, é necessário escolher um valor de T_{LK} para o qual as diferenças entre as transmitâncias do *Shortwave* e *R.Sun* sejam menores, uma vez que se pretende para uma transmitância atmosférica o mais parecida possível, verificar se os valores de radiação direta se mantêm idênticos. Desta forma, escolheu-se T_{LK} igual a 2.5. Definidos todos os parâmetros para a transmitância atmosférica τ_d , obtiveram-se os resultados da Figura 4.4.

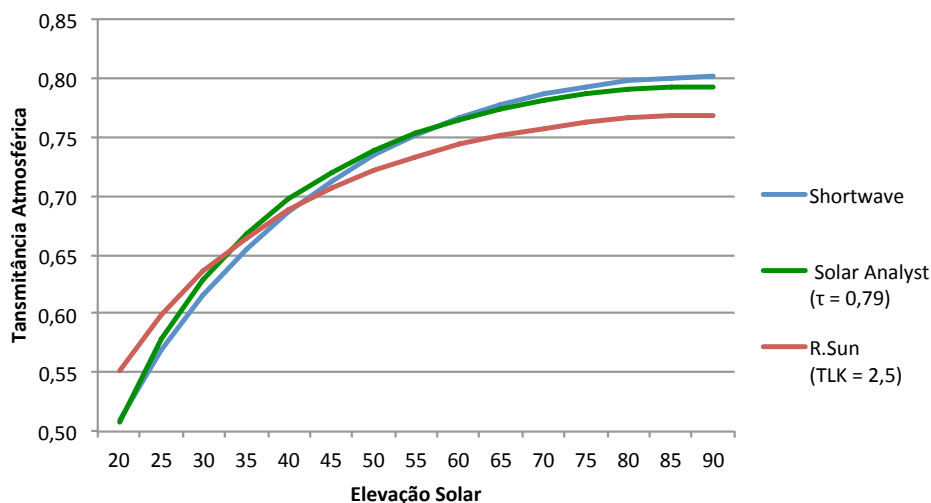


Figura 4.4 – Transmitância atmosférica com os parâmetros específicos definidos

O *Shortwave* e o *Solar Analyst* apresentaram valores muito idênticos para a transmitância atmosférica ao longo dos diferentes ângulos de elevação solar. O *R.Sun* distanciou-se dos outros modelos, principalmente para os ângulos de elevação solar maiores.

Para concluir esta secção, note-se que τ_d é função da massa de ar M . No entanto, para tomar em conta as pequenas diferenças registadas no gráfico da Figura 4.1, relativamente à massa de ar M , calculou-se a transmitância atmosférica τ_d em função da variação da elevação solar α . Desta forma, o gráfico da Figura 4.4 contabiliza as diferenças existentes nas fórmulas utilizadas até chegar às fórmulas da transmitância atmosférica dos diferentes modelos.

4.2 Avaliação comparativa dos modelos

4.2.1 Radiação direta

Uma vez estabelecidos os parâmetros para se obter um valor de transmitância atmosférica τ_d idêntico nos três modelos, correram-se os modelos para o cálculo da radiação direta R_d para um plano horizontal fictício localizado onde se encontra a Estação Meteorológica de Coimbra. Depois de se fazerem as conversões necessárias para que todos os valores estivessem nas mesmas unidades (Secção 3.2.1), obtiveram-se os resultados indicados na Figura 4.5.

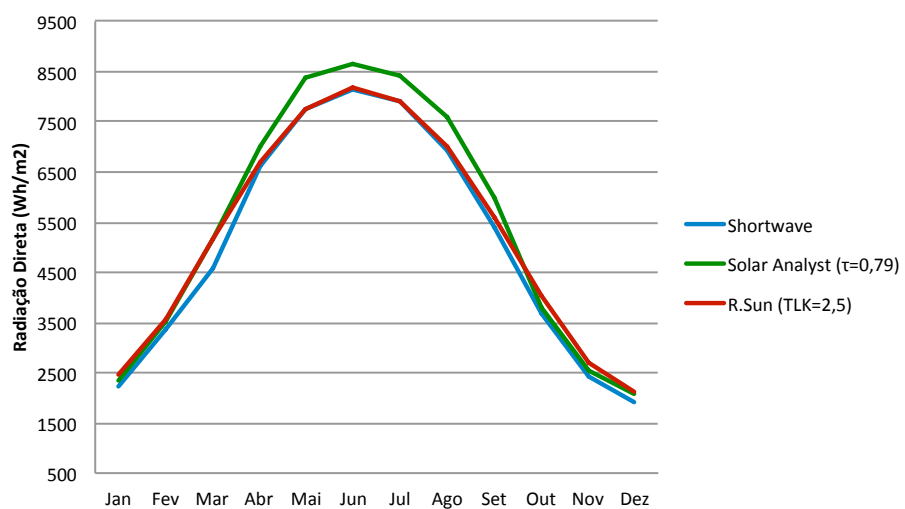


Figura 4.5 - Radiação direta com os parâmetros específicos definidos

De acordo com os valores que tinham sido obtidos para transmitância atmosférica τ_d (Fig. 4.4) seria de esperar uma coesão maior entre os resultados da radiação direta do

Shortwave e do *Solar Analyst*. Isso não se sucedeu, e foram resultados do *Shortwave* e o *R.Sum* os mais semelhantes ao contrário do que se esperava, à exceção do mês de Março. De facto, o *Solar Analyst* só se enquadrou mais com os outros modelos nos meses mais quentes quando se utilizou um $\tau = 0,75$ (Fig. 4.6).

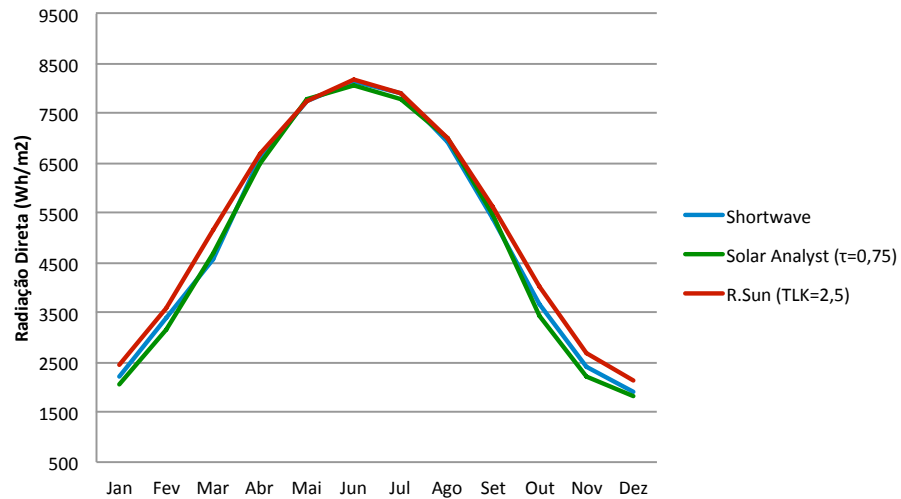


Figura 4.6 – Radiação direta obtida com a alteração de $\tau = 0,75$ para o *Solar Analyst*

A única explicação para o *Solar Analyst* se ter afastado dos outros modelos com um $\tau = 0,79$ nos meses mais quentes é este modelo utilizar mais fórmulas do que daquelas que de facto os seus autores explicam (Fu and Rich, 2000). Ainda em relação ao *Solar Analyst*, verifica-se que apesar da curva deste se ter aproximado nos meses quentes dos outros modelos para um $\tau = 0,75$, afastou-se ligeiramente nos meses mais frios, nomeadamente em relação ao *R.Sum*. Desta forma, nenhum valor de τ fará com que os valores de radiação direta do *Solar Analyst* possam ser idênticos aos dos outros modelos para todo o ano.

4.2.2 Radiação difusa

A radiação difusa R_f é calculada de formas muito variadas pelos modelos e não existe uma relação entre as fórmulas utilizadas por cada um. A abordagem possível nesta situação é analisar visualmente as diferenças dos modelos para esta componente da radiação ao longo dos meses do ano. Os resultados obtidos foram os seguintes (Fig. 4.7):

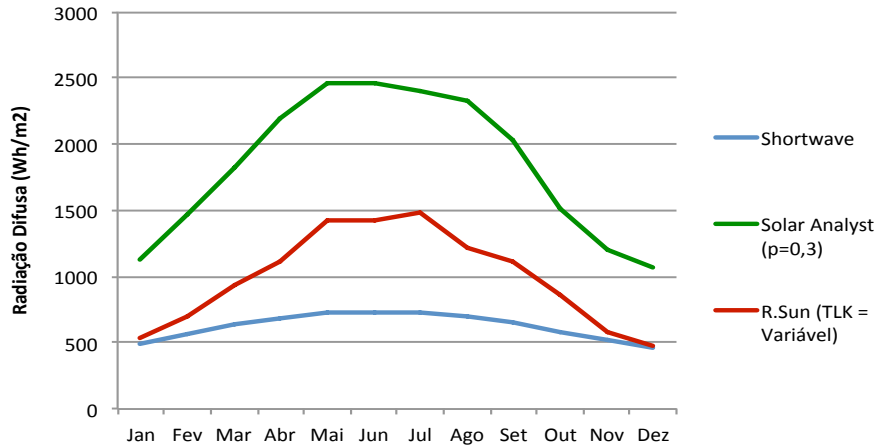


Figura 4.7 – Radiação difusa obtida pelos modelos

Para a descrição feita para os modelos relativamente à componente da radiação difusa na Secção 2.2 já se tinham verificado a utilização de fórmulas muito diferentes para esta componente, através da Figura 4.7 confirmam-se as diferenças obtidas entre os resultados de cada modelo. A radiação difusa está muito associada às condições atmosféricas, uma vez que representa uma componente que atinge a superfície de forma indireta, ou seja, depois de colidir e dispersar nos constituintes atmosféricos. No entanto, é interessante verificar na Figura 4.7 que em qualquer um dos modelos os valores de radiação difusa são maiores nos meses quentes e menores nos meses frios. Isso mostra que apesar de haver uma menor nebulosidade nos meses quentes (Tab. 3.1) o contacto da radiação solar com outras poeiras e gases é maior neste mesmo período.

O *Solar Analyst* aplica, à semelhança do que se verificou para a radiação direta, um parâmetro específico τ_f (p na Figura 4.7) para a radiação difusa, que é a proporção da radiação global que é difusa (também igual a $\frac{D}{G}$) e foi utilizado o valor predefinido pelo modelo, igual a 0,3. Se fossem utilizados os valores mensais de $\frac{D}{G}$ (fornecido pela Estação Meteorológica ou PVGIS) para o parâmetro τ_f na Equação 2.24, as diferenças seriam ainda maiores entre os modelos, uma vez que o $\frac{D}{G}$ apresenta sempre valores superiores a 0.3 para Coimbra e a um τ_f maior corresponde uma radiação difusa R_f maior também. O *R.Sun* utilizou um T_{LK} variável de acordo com os valores da Tabela 3.2 o que provocou na sua curva uma forma mais complexa. Para um T_{LK} igual a 2.5 (não indicado na Figura 4.7) os valores do *R.Sun* aproximaram-se dos valores do *Shortwave*, este último mostrou ter uma curva muito próxima de uma parábola e com uma pequena variação ao longo do ano.

4.3 Comparação dos modelos com os dados da estação meteorológica

4.3.1 Radiação direta

- **Shortwave**

A forma simples que o *Shortwave* tem, não põe grandes dúvidas em relação à sua execução para realizar a simulação, na medida em que não dispõe de parâmetros específicos como os outros modelos. Desta forma, e em comparação com os valores de radiação direta disponibilizados pela Estação Meteorológica de Coimbra, obtiveram-se os seguintes valores para os diferentes meses do ano (Fig. 4.8).

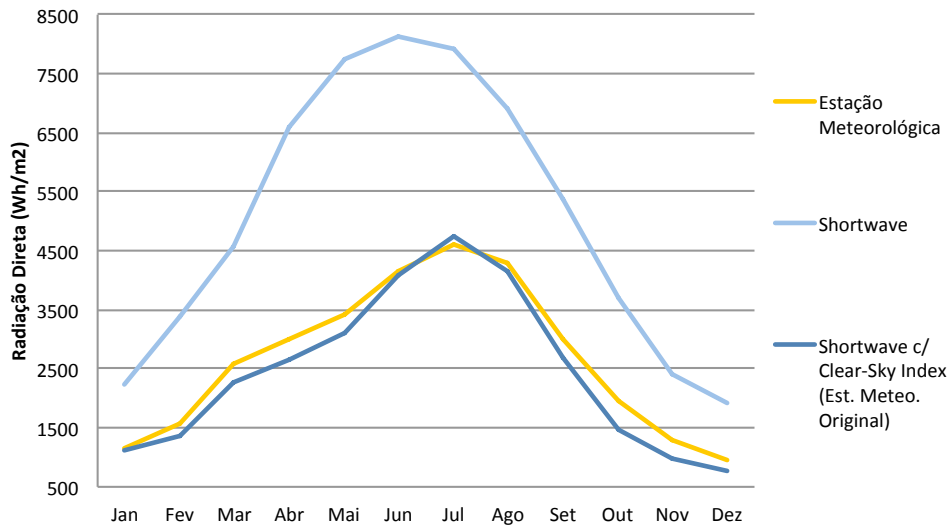


Figura 4.8 – Comparação da radiação direta obtida pelo *Shortwave* e a estação meteorológica

A linha azul “transparente” representa a radiação direta calculada pelo *Shortwave* antes de se aplicar o fator de nebulosidade da estação meteorológica convertido para *Clear-sky index* através da Equação 3.5. A linha azul mostra os resultados obtidos para o *Shortwave* com a aplicação do *Clear-sky index* da estação meteorológica (Tabela 3.1). Os resultados obtidos não registaram para nenhum mês uma diferença superior a 500 Wh/m². Tendo em conta que os fatores de nebulosidade da estação meteorológica apresentam dados muito arredondados e o *Shortwave* ser um modelo que aplica fórmulas empíricas que não foram parametrizadas na Europa, os resultados são bastante satisfatórios.

- **Solar Analyst**

O *Solar Analyst* utiliza o parâmetro específico τ . A análise feita anteriormente em relação a este parâmetro mostrou que $\tau = 0,75$ era o valor que permitia obter níveis de radiação direta mais semelhantes em relação aos outros modelos (Secção 4.2.1), apesar dos valores de transmitância atmosférica τ_a serem idênticos aos do *Shortwave* para $\tau = 0,79$ (Fig. 4.1). Para $\tau = 0,75$ e com o factor de nebulosidade (transformado para *Clear-sky index*) (Tabela 3.1), obtiveram-se os seguintes resultados para a radiação direta (Fig. 4.9):

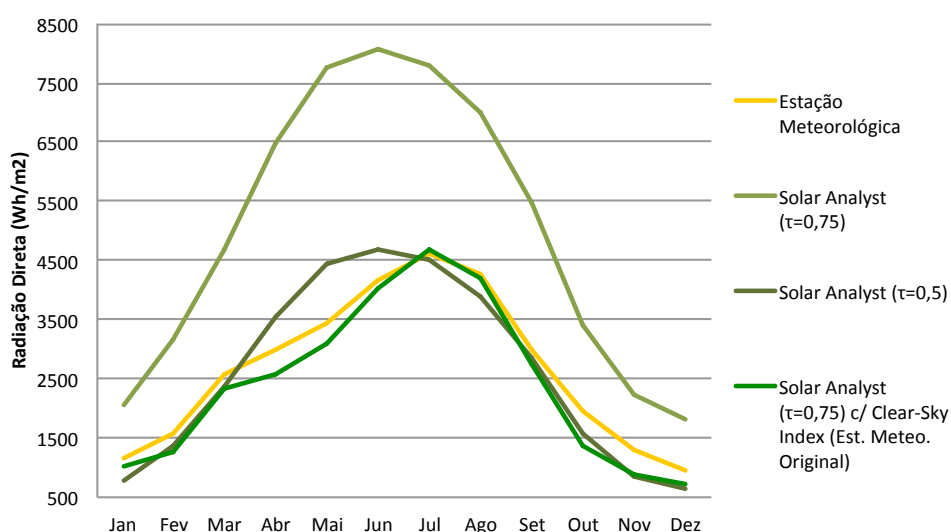


Figura 4.9 – Comparação da radiação direta obtida pelo *Solar Analyst* e a estação meteorológica

Os valores obtidos pelo modelo ficam próximos dos medidos pela estação, aplicando $\tau = 0.75$ com o *Clear-sky index* da estação. O que seria de esperar, uma vez que para condições de céu limpo e aplicando $\tau = 0.75$ a curva do *Solar Analyst* encontrou-se bem perto da curva do *Shortwave* (Figura 4.6). Outra comparação foi feita no gráfico da Figura 4.9. Segundo o autor do *Solar Analyst* (Fu and Rich, 2000), τ tem um valor igual a 0.5 para condições de céu geralmente limpo. É o valor predefinido para o modelo. De facto, aplicando o modelo com esse valor observou-se, sem aplicar o *Clear-sky index*, resultados muito próximos dos medidos pela estação, à exceção dos meses de Abril, Maio e Junho. Isto mostra que o *Solar Analyst* considera, ao contrário do que se esperava, nos seus parâmetros com valores predefinidos, as condições de céu reais.

- **R.Sun**

Para comparar os resultados do *R.Sun* com os dados da estação meteorológica utilizou-se um valor fixo para o T_{LK} igual a 2.5 (de acordo com o que tinha sido escolhido na Secção 4.1) e depois um valor de T_{LK} variável de acordo com os dados do *SoDa* para Coimbra (Tab. 3.2). Foi ainda utilizado o *Clear-sky index* da estação meteorológica (Tab. 3.1) para os T_{LK} fixo e variável. Os resultados estão indicados na Figura 4.10:

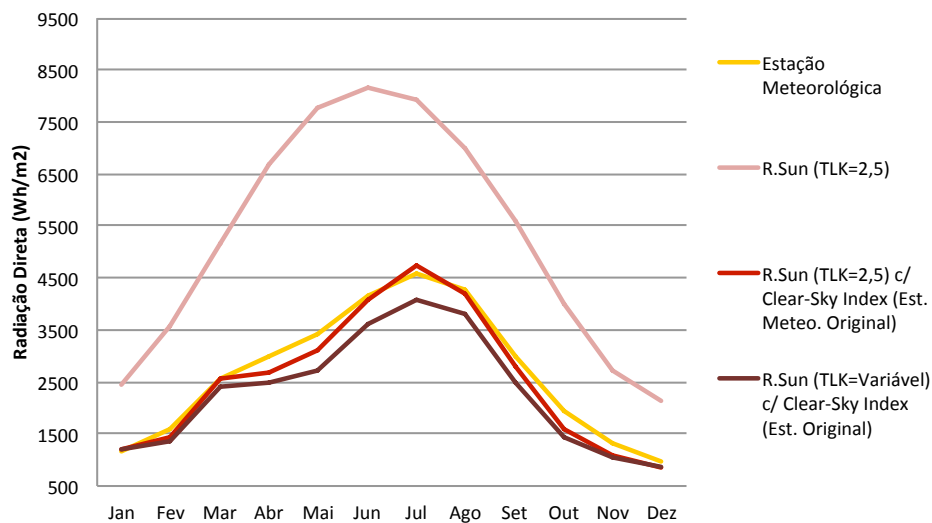


Figura 4.10 – Comparação da radiação direta obtida pelo *R.Sun* e a estação meteorológica

Para o T_{LK} igual a 2.5 com o *Clear-sky index* da estação meteorológica, o resultado obtido ficou ligeiramente mais perto dos valores da estação meteorológica comparando com o que se verificou para o *Shortwave* (Fig. 4.8) e para o *Solar Analyst* (Fig. 4.9). As pequenas diferenças registadas entre a curva do *R.Sun* e as curvas do *Solar Analyst* e do *Shortwave* nos meses mais frios na Figura 4.6 foram o suficiente para aproximar o *R.Sun* dos dados da estação meteorológica nesses meses. Para o T_{LK} variável ao longo dos meses e com o *Clear-sky index* da estação, a curva do *R.Sun* afasta-se da curva da estação meteorológica (Fig. 4.10). Uma possível justificação para este afastamento é o fator de nebulosidade disponibilizado pela estação já incorporar de certo modo T_{LK} . Na verdade, sabe-se pouco a cerca da maneira como foi determinado o fator de nebulosidade.

4.3.2 Radiação difusa

Para a radiação difusa não está disponível o fator de nebulosidade da estação meteorológica pelo que nos resta fazer a comparação com os dados da estação sem a utilização desse fator. Os resultados estão indicados na Figura 4.11:

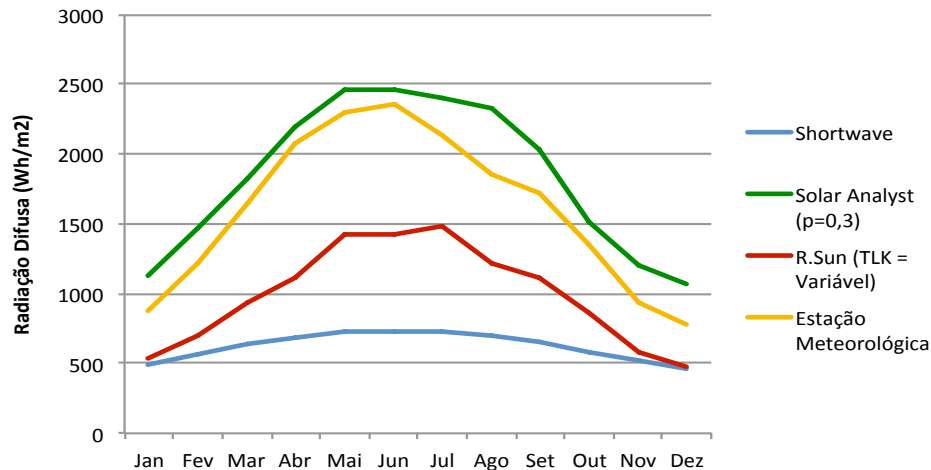


Figura 4.11 – Comparação da radiação difusa obtida pelos modelos e a estação meteorológica

Já se tinha verificado na Figura 4.7 uma grande disparidade entre os resultados obtidos pelos modelos para a radiação difusa. Agora com os dados da estação mais algumas comparações se podem fazer. Volta a sobressair uma característica do *Solar Analyst* já verificada na radiação direta, quando se utilizou $\tau = 0.5$ (Fig. 4.9). Ao utilizar o parâmetro predefinido do modelo, neste caso para a radiação difusa com $\tau_f = 0.3$, o *Solar Analyst* voltou a apresentar uma curva não muito distante da curva dada pela estação meteorológica. Para o *R.Sun* com T_{LK} variável a sua curva ficou bastante distante dos dados da estação, bem como a curva do *Shortwave*. Ao contrário do que se verifica para a radiação direta, em que os níveis de radiação calculados pelos modelos são maiores que os dados pela estação sem a utilização do *Clear-sky index* (Figs. 4.8, 4.9 e 4.10), na radiação difusa verifica-se a situação oposta com a exceção do *Solar Analyst*. Esta situação mostra que as componentes da radiação direta e difusa são opostas, isto é, quando uma aumenta a outra diminui, confirmando o explicado na Secção 2.1.12. Os modelos, sem utilizar um *Clear-sky index*, calculam a radiação solar para condições de céu limpo, isso traduz-se num aumento da radiação direta face à radiação difusa comparando com os dados da estação meteorológica. Quando se consideram as condições reais, utiliza-se um *Clear-sky index* para cada componente da radiação e existe um aumento da radiação difusa face à radiação direta.

4.4 Análise dos dados fornecidos pelo PVGIS

4.4.1 Comparação com os dados da estação meteorológica

Os dados fornecidos pelo PVGIS tomam mais relevância quando se pretende analisar superfícies inclinadas. A estação meteorológica apenas nos fornece valores de radiação horizontais. Desta forma, torna-se importante comparar os dados da Estação Meteorológica de Coimbra com os dados do PVGIS para o mesmo local. Para a radiação direta, difusa e global obtiveram-se os gráficos seguintes (Fig. 4.12):

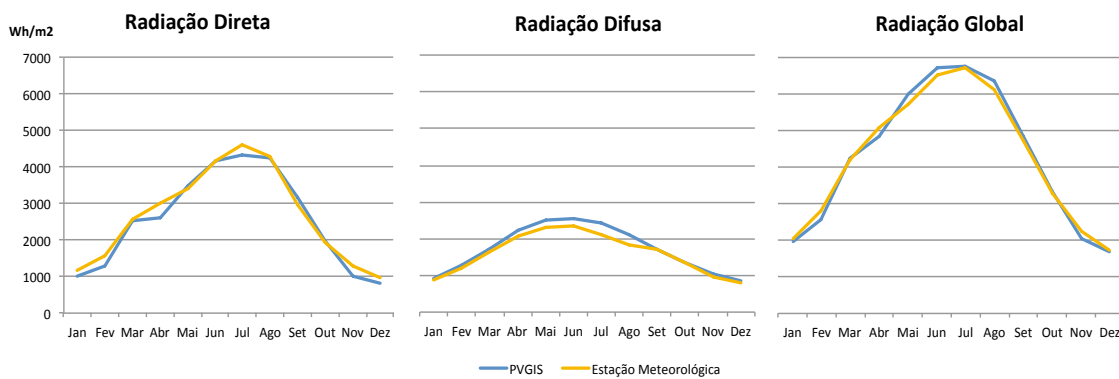


Figura 4.12 - Comparação da radiação direta, difusa e global entre o PVGIS e a estação meteorológica para uma superfície horizontal

Existem pequenas diferenças para a radiação direta, nomeadamente para os meses de Abril e Julho e para a radiação difusa nos meses mais quentes. No entanto, essa discrepância é minimizada quando se somam as duas componentes para obter a radiação global. No geral, verifica-se uma grande coesão entre os resultados provenientes das duas fontes.

4.4.2 Variação da radiação solar para diferentes inclinações

A radiação direta e da radiação difusa variam de acordo com diferentes inclinações e exposições. Daí a importância de modelos matemáticos para simular a radiação solar, uma vez que têm capacidade para calcular a radiações solar em superfícies complexas. Para medir o impacto que diferentes inclinações têm no resultado da radiação solar, consideraram-se as inclinações de -25° (virada a norte), horizontal e 25° (virada a sul). Obtiveram-se do PVGIS os resultados das Figuras 4.13 e 4.14, para a radiação direta e difusa, respectivamente:

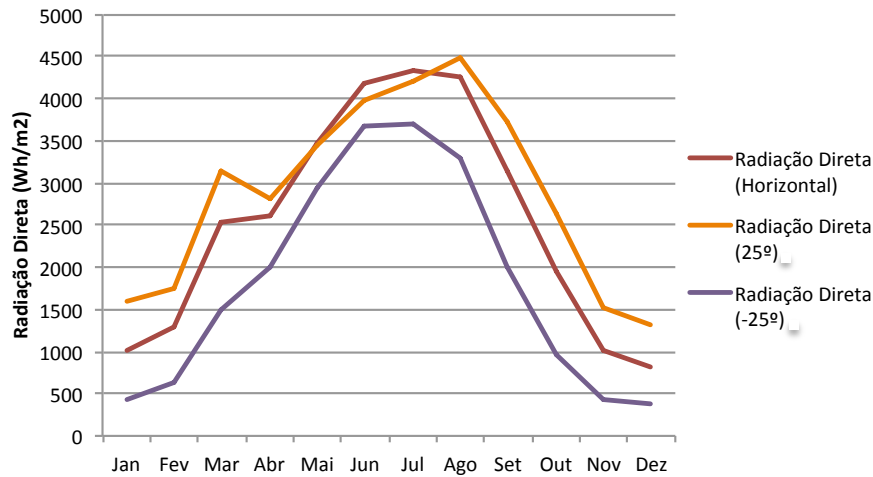


Figura 4.13 – Variação da radiação direta obtida pelos PVGIS para diferentes inclinações

As diferenças são significativas para a radiação direta entre as inclinações. Para o mês de Março essa diferença ascende aos 1500 Wh/m². Curiosamente para o mês de Junho e Julho uma superfície horizontal é mais irradiada que uma superfície inclinada 25° a sul. Esse facto é justificado por ser nessa época do ano que o Sol atinge a sua elevação solar máxima, perto dos 80° no local em questão. Deste modo, também se verifica que desde Abril até Agosto não existem grandes diferenças de valores entre estas duas superfícies. As maiores perdas verificam-se na superfície virada a norte (-25°) que se mantém significativamente distância das outras curvas pelo menos 500 Wh/m² ao longo do ano.

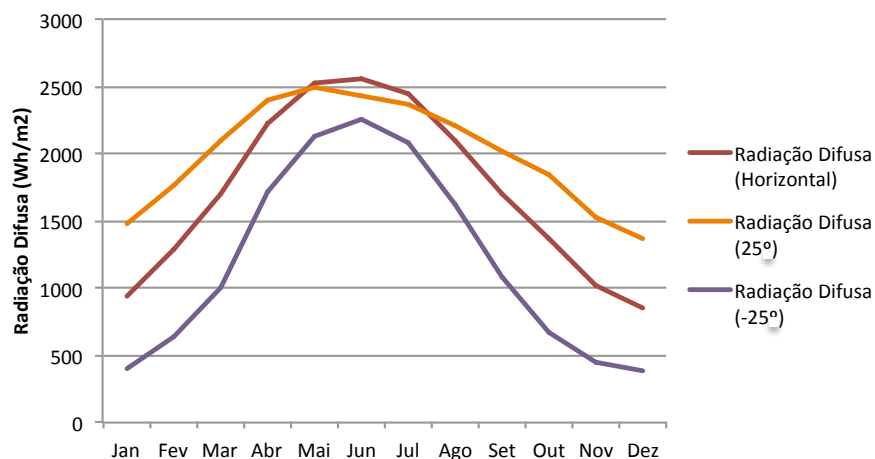


Figura 4.14 - Variação da radiação difusa obtida pelo PVGIS para diferentes inclinações

Para a radiação difusa, a diferença entre inclinações chega ao seu máximo nos meses mais frios, registando diferenças superiores a 1000 Wh/m^2 entre as inclinações viradas a sul (25°) e as inclinações viradas a norte (-25°). Nos meses de Maio, Junho e Julho a radiação difusa é maior na superfície horizontal do que na superfície inclinada a sul (25°) pelas razões já descritas também na radiação direta. E neste mesmo período as diferenças entre as curvas são mínimas quando comparadas para o resto do ano, mesmo para a inclinação virada a norte (-25°). Os gráficos das Figs. 4.13 e 4.14 mostram o quão importante é considerar a inclinação (ou o declive do terreno) no cálculo da radiação solar.

4.5 Parametrização do *Clear-sky index* para a cidade de Coimbra

Para estimar a radiação solar com cada um dos modelos numa superfície complexa e para as condições de céu reais é necessário parametrizar um *Clear-sky index*. Um para a componente da radiação direta e outro para a componente da radiação difusa. Essa parametrização pode ser feita com recurso aos valores de radiação direta e difusa disponibilizados pela estação meteorológica ou pelo PVGIS. O fator de nebulosidade fornecido pela estação meteorológica depois de convertido para *Clear-sky index* (Eq. 3.5) apresentou resultados positivamente surpreendentes quando comparados com os próprios dados de radiação direta disponibilizados pela estação (Secção 4.3.1), no entanto esse factor apenas se pode aplicar nesta componente da radiação. De qualquer forma, o método utilizado nesta secção para parametrizar um *Clear-sky index* para a radiação direta parece fornecer resultados mais precisos do que esses valores disponibilizados pela estação na Tabela 3.1. Os *Clear-sky index* para a radiação direta e para a radiação difusa são calculados através das Equações 3.8 e 3.9, respectivamente, juntamente com os dados da estação meteorológica ou do PVGIS.

Outro assunto a analisar nesta secção é a possível correlação entre o $\frac{D}{G}$ disponibilizado pela estação e os *Clear-sky index* estimados para a radiação direta.

4.5.1 Dados da estação meteorológica

4.5.1.1 Radiação direta

Para a radiação direta os valores *Clear-sky index* estimados para cada um dos modelos estão representados na Figura 4.15, bem como a curva de $\frac{D}{G}$ fornecida pela estação.

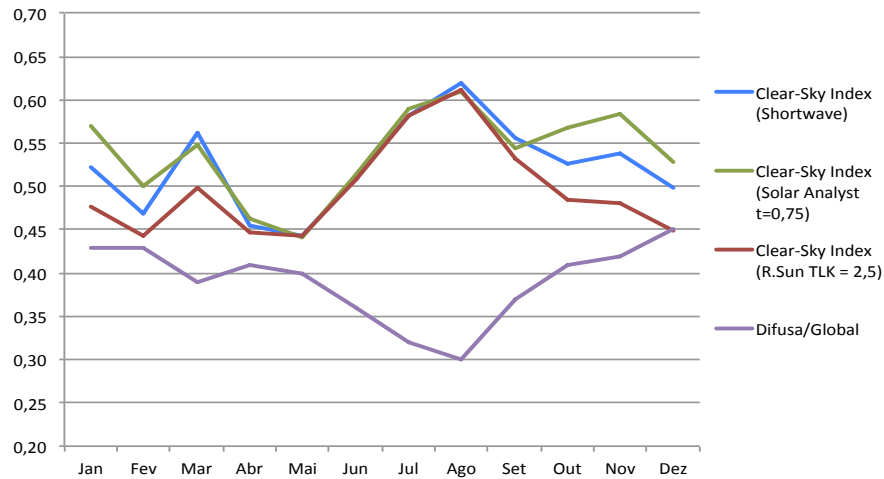


Figura 4.15 – *Clear-sky index* da radiação direta para o *Shortwave*, *Solar Analyst* e *R.Sun* obtido através da estação meteorológica; Curva D/G da estação meteorológica

Analisando os resultados, observa-se entre as curvas do *Clear-sky index* para os diferentes modelos uma maior proximidade nos meses quentes e uma distância maior nos meses frios, tal como já se tinha verificado nos resultados obtidos para a radiação direta no plano horizontal (Fig. 4.6). Também os modelos, *Solar Analyst* e o *R.Sun*, foram executados com os mesmo valores para os parâmetros específicos τ e T_{LK} , respetivamente 0.75 e 2.5. Ainda de acordo com a Figura 4.15, é visível uma correlação inversa entre os valores do *Clear-sky index* e do $\frac{D}{G}$ da estação meteorológica, nomeadamente com a curva do *R.Sun*. O gráfico da Figura 4.16 confirma essa correlação entre essas duas curvas:

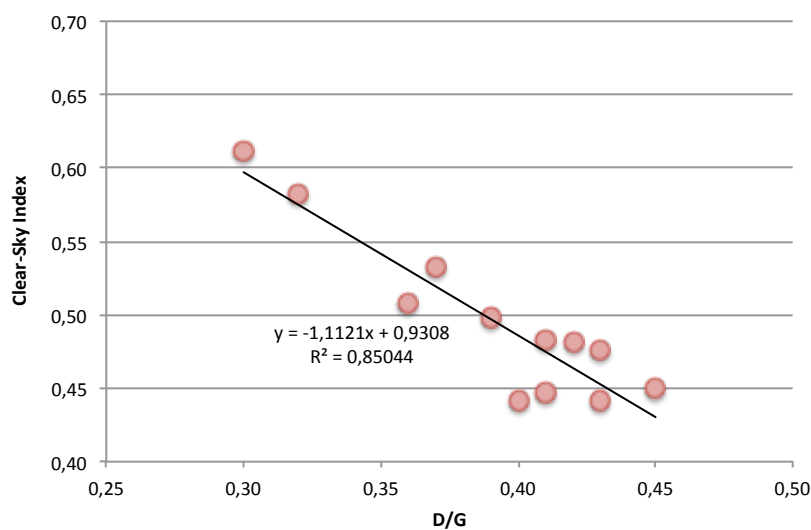


Figura 4.16 – Correlação entre o *Clear-sky index* da radiação direta para o *R.Sun* com $T_{LK} = 2,5$ e o D/G da estação meteorológica

O valor obtido pelo coeficiente de determinação ($R^2 = 0.85044$) mostra a existência de uma correlação forte entre o *Clear-sky index* estimado para o *R.Sun* (eixo dos *yy*) e a curva $\frac{D}{G}$ da estação meteorológica (eixo dos *xx*). Para o *R.Sun* ainda se criou um *Clear-sky index* baseado nos valores de radiação direta calculados com T_{LK} variável e obtiveram-se os resultados indicados na Figura 4.17 que juntamente mostra de novo a curva de $\frac{D}{G}$ da estação meteorológica.

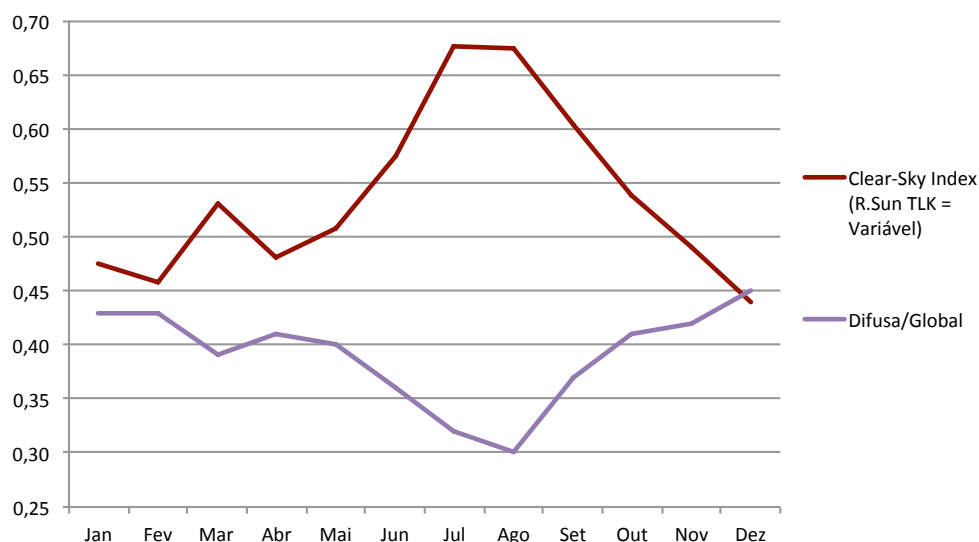


Figura 4.17 – *Clear-sky index* da radiação direta para o *R.Sun* com T_{LK} variável; curva D/G da estação meteorológica

Voltou a calcular-se a correlação com os novos dados e obtiveram-se os resultados seguintes (Fig. 4.18):

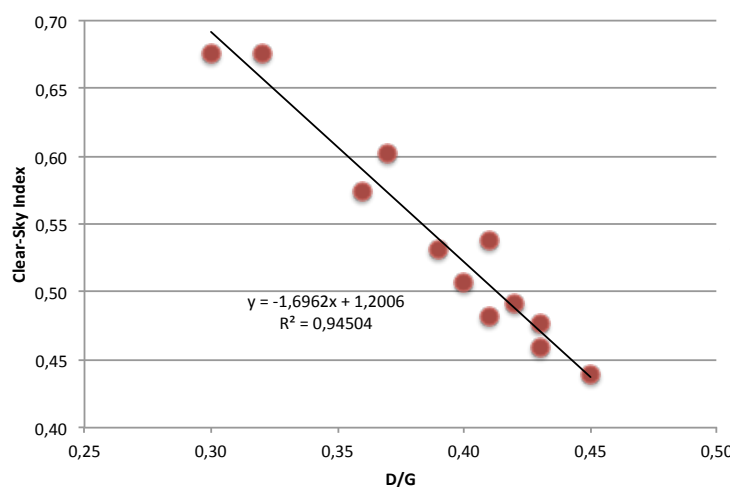


Figura 4.18 – Correlação entre o *Clear-sky index* da radiação direta para o *R.Sun* com T_{LK} variável e o D/G da estação meteorológica

Para um T_{LK} a variar mensalmente, essa correlação ainda se tornou maior com $R^2 = 0.94504$. Com este resultado, confirma-se a existência de uma relação forte entre o *Clear-sky index* e o $\frac{D}{G}$ da estação meteorológica e fica também mais evidente a importância de utilizar um T_{LK} variável, na medida em que se confirma a fiabilidade dos dados e resultados obtidos. Desta forma, será possível estimar um *Clear-sky index* para Coimbra, conhecendo $\frac{D}{G}$ da estação meteorológica. A Equação 4.1 foi obtida por Regressão Linear através do Método dos Mínimos Quadrados:

$$k_c = -1.6962 \frac{D}{G} + 1.2006 \quad (4.1)$$

k_c é o *Clear-sky index* da radiação direta para o *R.Sun* e $\frac{D}{G}$ é o fator da quantidade de radiação difusa disponibilizado pela estação meteorológica.

4.5.1.2 Radiação difusa

A parametrização do *Clear-sky index* para a radiação difusa é indispensável para considerar as condições de céu reais. O comportamento para esta componente é completamente distinto entre os modelos como se pode observar na Figura 4.19, tornando difícil a sua comparação.

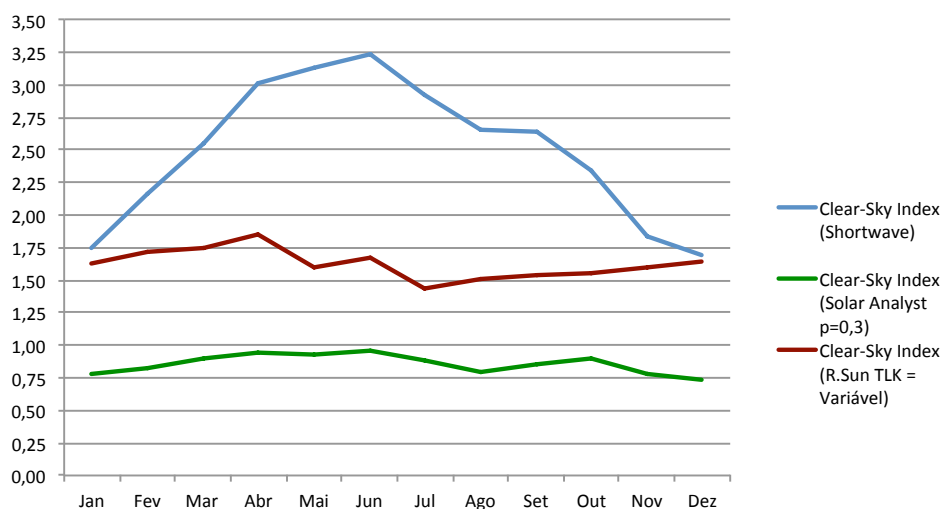


Figura 4.19 – *Clear-sky index* da radiação difusa para o *Shortwave*, *Solar Analyst* e *R.Sun* obtido através da estação meteorológica

Analisando o gráfico da Figura 4.19, observa-se que o *Shortwave* necessita de um *Clear-sky index* que apresente uma grande variação ao longo dos meses, ao contrário dos outros modelos que requerem um *Clear-sky index* que se mantém relativamente constante, principalmente, o *Clear-sky index* do *Solar Analyst*. Para este caso, a compensação do *Clear-sky index* é bem menor do que a verificada para os outros modelos, visto o seu valor encontrar-se perto de 1 ao longo de todos os meses, nunca oscilando mais de 0.25. A razão para este resultado do *Clear-sky index* do *Solar Analyst* e este ter apresentado logo um valor para a radiação difusa muito parecido com a dos dados da estação meteorológica para a mesma componente (Secção 4.3.2).

4.5.2 Dados do PVGIS

4.5.2.1 Radiação direta

Tal como foi realizada a parametrização do *Clear-sky-index* dos modelos com os dados da estação meteorológica, fez-se o mesmo com os dados do PVGIS. Os resultados estão indicados na Figura 4.20, juntamente com a curva $\frac{D}{G}$ fornecida pelo PVGIS:

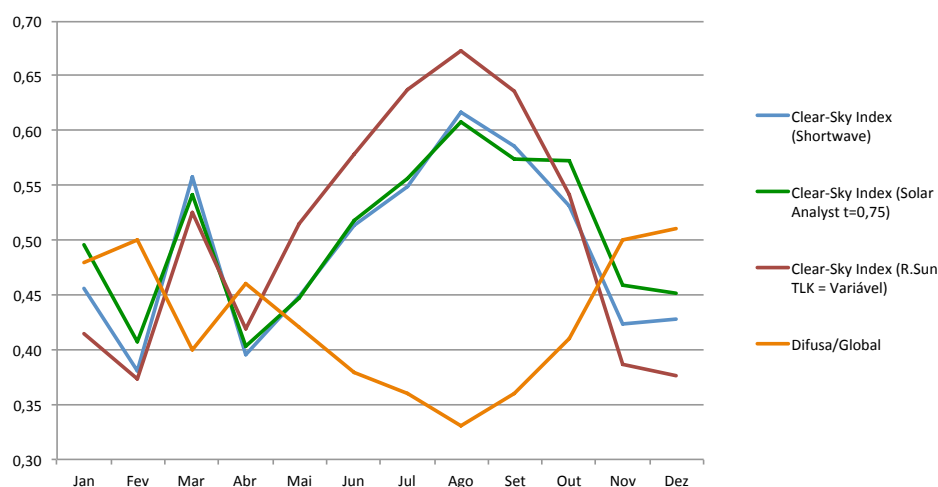


Figura 4.20 – *Clear-sky index* da radiação direta para o *Shortwave*, *Solar Analyst* e *R.Sun* obtido através do PVGIS; Curva D/G do PVGIS

Para o *Shortwave* e para o *Solar Analyst*, os seus *Clear-sky index* apresentam valores muito semelhantes para todo o ano, principalmente entre Março e Setembro. Contrariamente, o *Clear-sky index* do *R.Sun* apresenta-se distante, porque o *Clear-sky index* foi estimado para o *R.Sun* com T_{LK} Variável e não para um T_{LK} igual a 2.5 como realizado na Secção 4.5.1.1. A curva do *Clear-sky index* para o *R.Sun* volta a indicar uma forte correlação inversa com

a curva $\frac{D}{G}$. Desta forma, voltou-se a calcular a correlação existente entre estas duas curvas e obtiveram-se os resultados indicados na Figura 4.21:

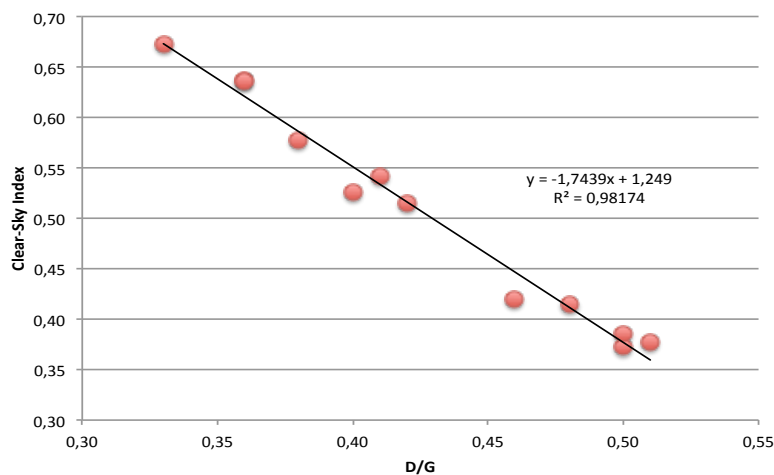


Figura 4.21 – Correlação entre o *Clear-sky index* da radiação direta para o *R.Sun* com T_{LK} variável e o D/G do PVGIS

O coeficiente de determinação obtido é de 0.98, o que mostra a existência de uma correlação muito forte entre os resultados do modelo e os dados do PVGIS. Uma correlação ainda maior do que a verificada com os dados da estação meteorológica (Figura 4.18). Para o *R.Sun* será possível estimar o *Clear-sky index* para a radiação direta através da seguinte expressão (Eq. 4.2):

$$k_c = -1.7439 \frac{D}{G} + 1.249 \quad (4.2)$$

Para os outros modelos registaram-se coeficientes de determinação menores, iguais a 0.82 e 0.68, para o *Shortwave* e para o *Solar Analyst*, respectivamente (Figs. 4.22 e 4.23):

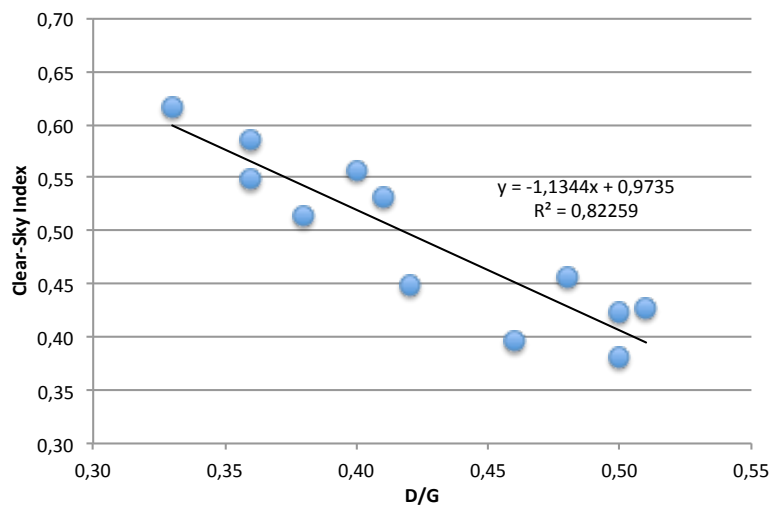


Figura 4.22 – Correlação entre o *Clear-sky index* da radiação direta para o *Shortwave* e o D/G do PVGIS

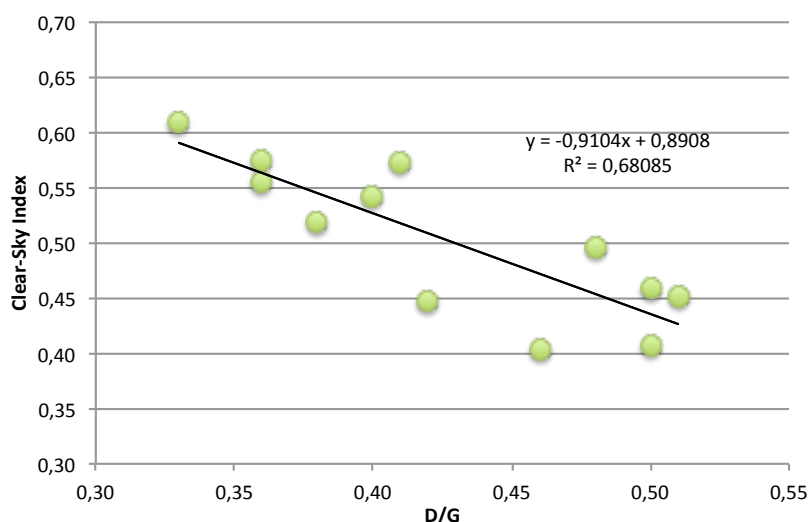


Figura 4.23 – Correlação entre o *Clear-sky index* da radiação direta para o Solar Analyst e o D/G do PVGIS

Tal como se sucedeu na parametrização do *Clear-sky index* com os dados da estação meteorológica, volta-se a verificar com os dados do PVGIS, a importância de utilizar um T_{LK} variável no modelo *R.Sun*. Só assim se conseguiu obter uma correlação tão forte com $\frac{D}{G}$.

4.5.2.2 Radiação difusa

De acordo com o PVGIS, os *Clear-sky index* para a radiação difusa a aplicar nos modelos estão indicados na Figura 4.24:

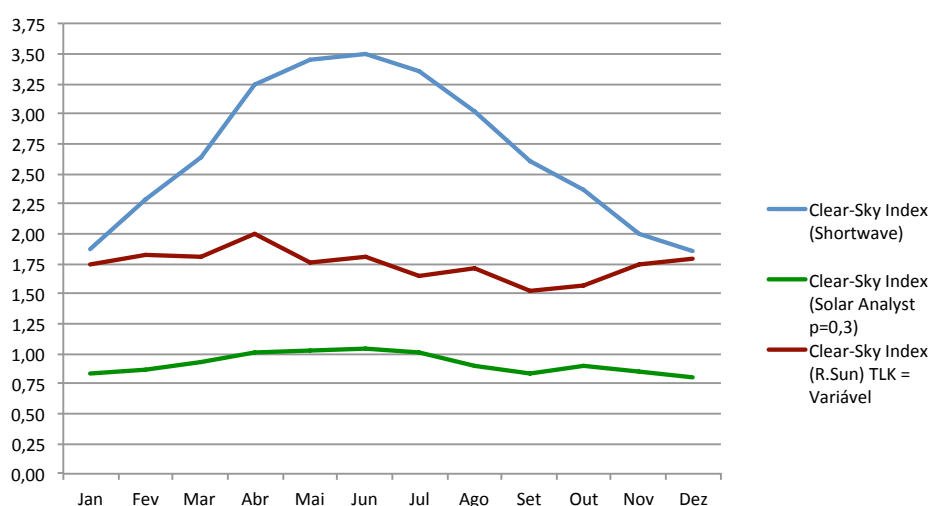


Figura 4.24 – *Clear-sky index* da radiação difusa para o *Shortwave*, *Solar Analyst* e *R.Sun* obtido através do PVGIS

Os resultados obtidos, tal como na Secção 4.5.1.2, não mostram qualquer tipo de relação entre os *Clear-sky index* estimados entre os diferentes modelos.

4.6 Cálculo e análise comparativa da radiação solar para um edifício

Para o edifício considerado obtiveram-se os seguintes *layouts* do declive e da orientação da área considerada (Fig. 4.25).

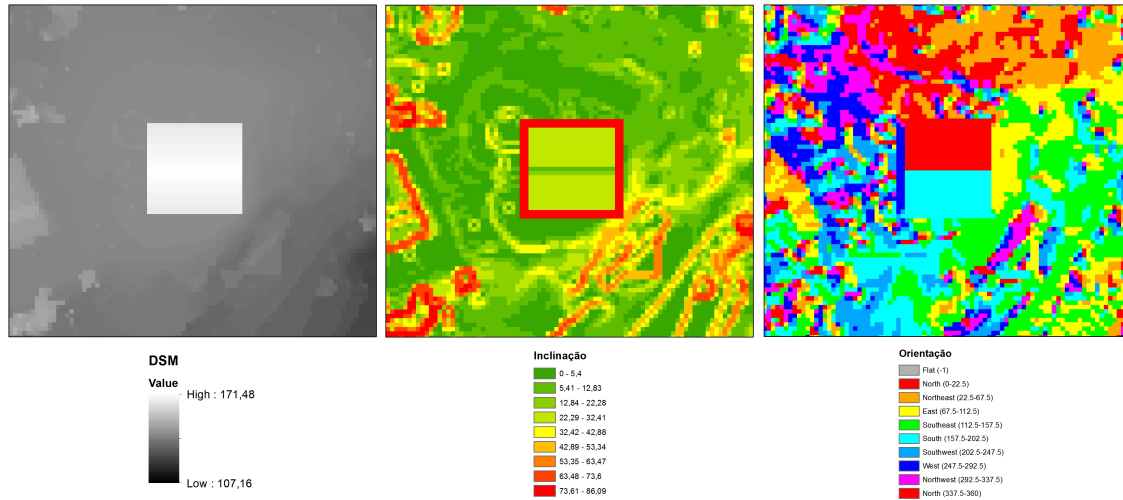


Figura 4.25 – MDS, Declive e Orientação do edifício

4.6.1 Radiação direta

Utilizando cada um dos modelos para calcular a componente da radiação direta e aplicando o *Clear-sky index* determinado com base nos valor do PVGIS (Secção 4.5.2.1), obtiveram-se os resultados da Figura 4.26. Considerou-se a titulo de exemplo o 3º Trimestre. As figuras para todos os trimestres e modelos estão disponíveis nos Anexos C, D e E.

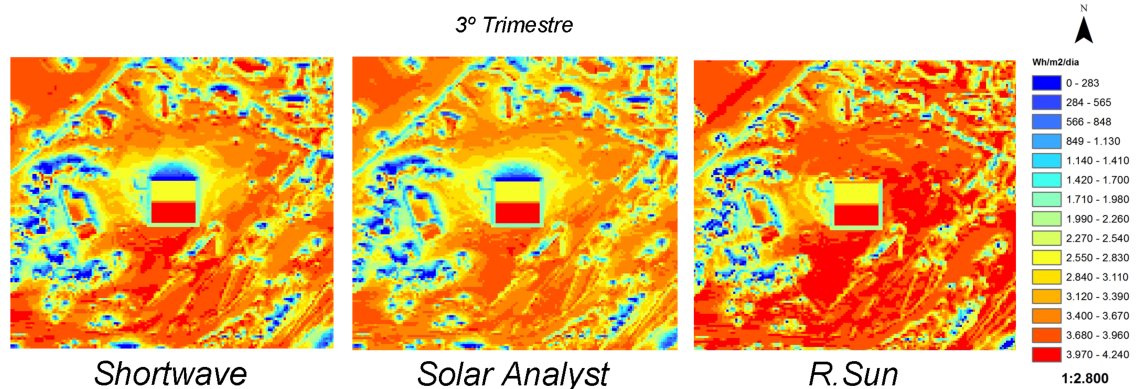


Figura 4.26 – Radiação direta para o 3º Trimestre

Os valores de radiação direta obtidos para a cobertura do edifício são semelhantes entre os modelos, no entanto, para a área envolvente ao edifício verificam-se algumas diferenças. O *R.Sun* apresenta uma área mais vermelha que o *Shortwave* e este último mais do que o *Solar Analyst*. No *R.Sun* identifica-se uma situação estranha que diz respeito ao efeito de sombra. Enquanto o *Shortwave* e o *Solar Analyst* moldam a sombra da mesma maneira, o *R.Sun* apresenta uma única sombra no lado Oeste do edifício, sendo de esperar, tal como se verifica no *Shortwave* e o *Solar Analyst*, que houvesse pelo menos uma sombra no lado norte. Não se encontrou uma justificação para este problema, no entanto o problema ficou aparentemente resolvido quando se considerou um MDS maior. O facto de a área envolvente ao edifício estar mais avermelhada no *R.Sun* do que nos outros modelos pode estar mesmo relacionada com o problema verificado no cálculo da sombra.

Para uma análise quantitativa, pretende-se comparar os valores obtidos pelos modelos e o PVGIS. Para a água do edifício virada a sul (com declive de 25°) obtiveram-se os valores para a radiação direta indicados na Figura 4.27:

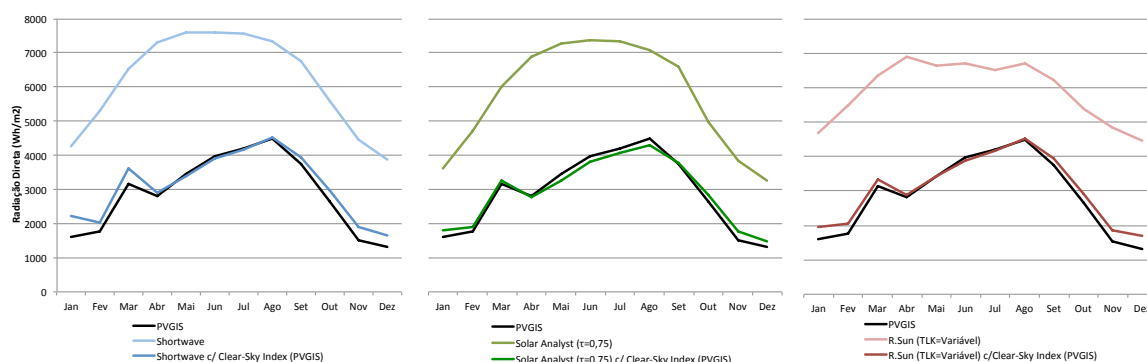


Figura 4.27 – Radiação direta numa superfície com declive de 25°

Os resultados dos modelos com o *Clear-sky index* mostraram pequenas diferenças em relação aos dados do PVGIS que foram sempre menores que 500 Wh/m². Nos meses quentes, o *Shortwave* e o *R.Sun* sobrepõem-se praticamente aos valores do PVGIS e a maior discrepância verifica-se nos meses mais frios, sendo que foi o *Solar Analyst* que apresentou uma diferença menor para esses meses. Para a água do telhado virada a norte (-25°), obtiveram-se os seguintes resultados (Fig. 4.28):

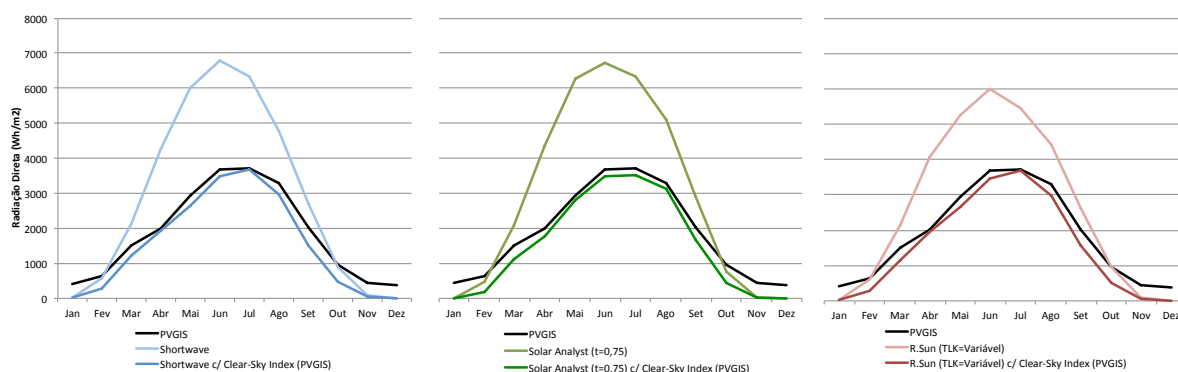


Figura 4.28 – Radiação direta numa superfície com declive de -25°

Para a água virada a norte verifica-se para todos os modelos e ao longo de todos os meses, em relação aos dados do PVGIS, uma diferença igualmente verificada para a água virada a sul, com diferenças inferiores a 500 Wh/m^2 .

4.6.2 Radiação difusa

Os resultados gráficos obtidos para a radiação difusa pelos modelos estão na Figura 4.29. Os *Clear-sky index* utilizados foram parametrizados através dos dados do PVGIS e estão disponíveis na Secção 4.5.2.2.

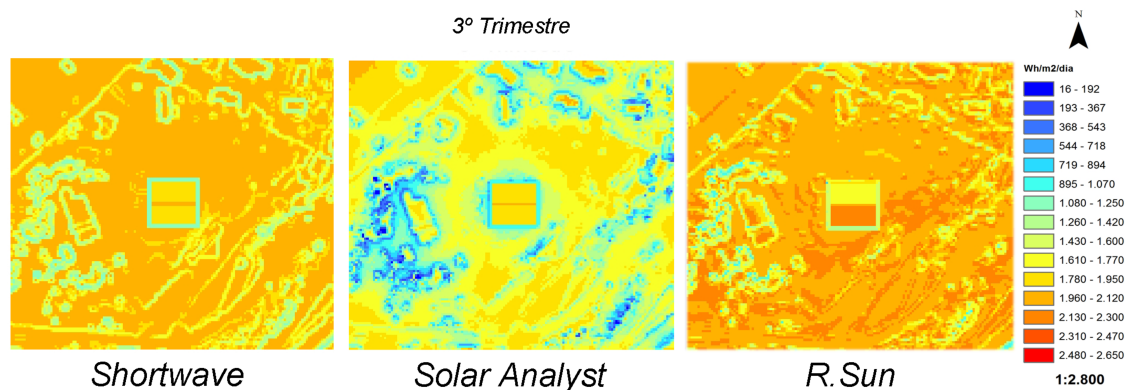


Figura 4.29 – Radiação difusa para o 3º Trimestre

Estes resultados mostram diferenças evidentes entre os modelos na abordagem a esta componente. Uma das únicas semelhanças encontradas entre os modelos diz respeito ao mesmo valor obtido nas águas de telhado viradas a norte e a sul nos modelos *Shortwave* e *Solar Analyst*. O resultado obtido pelo *Shortwave* mostra uma grande relação com o declive (Fig. 4.25) e de facto na descrição da sua fórmula para a radiação difusa esse é um parâmetro considerado (Eqs. 2.18). O *R.Sun* parece também depender muito do declive

do terreno e esse também é um parâmetro considerado (Eq. 2.44), mas também da orientação, porque a radiação difusa é maior nas superfícies inclinadas a sul. O *Solar Analyst* parece fazer uma abordagem diferente, sendo que a radiação difusa parece ir-se dispersando ao longo da superfície de forma mais complexa. A análise quantitativa para a água do telhado virada a sul (25°) ao longo de todos os meses do ano é mostrado nos gráficos da Figura. 4.30.

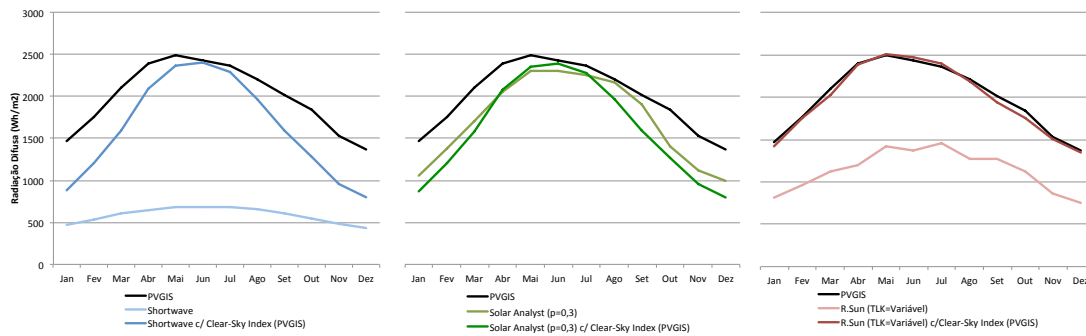


Figura 4.30 – Radiação difusa numa superfície com declive de 25°

O *Shortwave* com o *Clear-sky index* que foi parametrizado na Secção 4.5.2.2 aproxima-se da curva do PVGIS em Maio, Junho e Julho, no entanto mantém-se significativamente distante da curva do PVGIS no resto do ano. O *Solar Analyst* mostra algo que não se esperava, que era a curva de radiação difusa obtida pelo *Solar Analyst* sem o *Clear-sky index* apresentar-se mais próxima dos dados do PVGIS do que a curva do *Solar Analyst* com o *Clear-sky index*. De qualquer modo, já se tinha verificado para a radiação difusa que a utilização do parâmetro específico τ_f (ou p) com o valor predefinido do modelo ($p = 0.3$) fazia com que o resultado se aproximasse dos dados do PVGIS sem o *Clear-sky index* (Secção 4.3.2). A curva obtida para os modelos *Shortwave* e *Solar Analyst* com o *Clear-sky index* são, curiosamente, muito idênticas, apesar da correção de cada *Clear-sky index* ser completamente diferente em cada um dos modelos. Por outro lado, o *R.Sun* “encaixa-se” na curva do PVGIS. Para a água do telhado virada a norte, obtiveram-se os resultados da Figura 4.31:

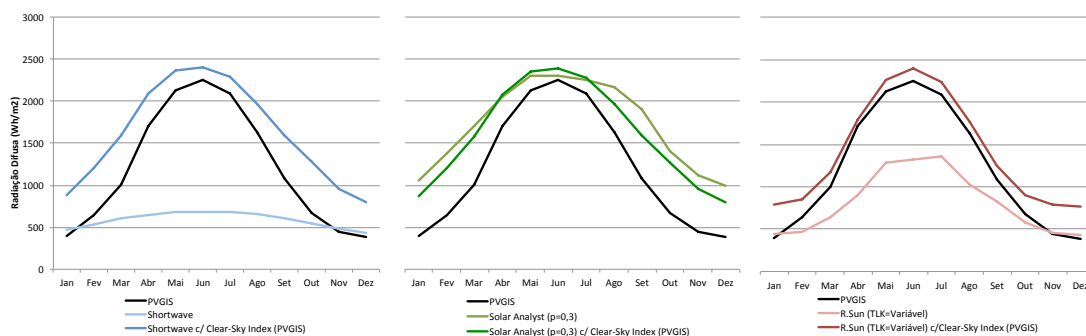


Figura 4.31 – Radiação difusa numa superfície com declive de -25°

A partir da Figura 4.31 conseguem fazer-se algumas análises importantes, nomeadamente comparando-a com as Figuras 4.29 e 4.30. O *Shortwave* e o *Solar Analyst* apresentaram para a água virada a norte (-25°) e para a água virada a sul (25°) exatamente os mesmos valores, sendo que a variação dos valores do PVGIS para as duas águas fez com que os resultados obtidos por esses modelos fossem inferiores aos do PVGIS para a água virada a sul (Fig. 4.30) e superiores aos do PVGIS para a água virada a norte (Fig. 4.31), respectivamente. A igualdade entre os resultados obtidos para as águas do telhado entre estes modelos não deixa de ser estranha, porque toda a área envolvente do edifício é completamente distinta entre os modelos na Figura 2.29. O *R.Sun* seguiu a tendência do PVGIS e para a água virada a sul também apresentou valores idênticos aos do PVGIS, principalmente entre Março e Setembro. Portanto, a abordagem feita pelo *R.Sun* em relação à radiação difusa aparenta ser parecida com a do PVGIS, pelo menos tendo em conta a orientação das superfícies. Na Secção 1.4.2 é também explicado que a base de dados do PVGIS utiliza o *R.Sun* como modelo de referência, logo não é completamente surpreendente que os resultados obtidos pelo *R.Sun* para a radiação difusa sejam tão idênticos aos dados do PVGIS.

4.6.3 Radiação refletida

Apenas o *Shortwave* e o *R.Sun* consideram a componente da radiação refletida. Após a simulação obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 4.32:

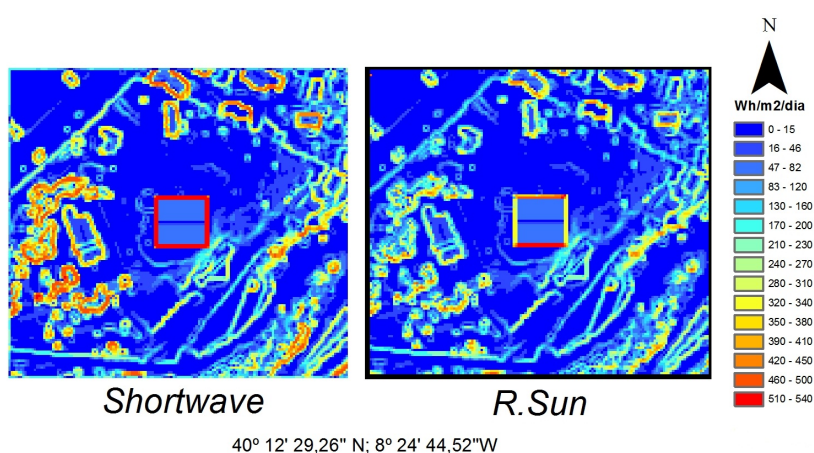


Figura 4.32 – Radiação refletida para um ano

Os valores obtidos para a cobertura do edifício são praticamente insignificantes, no entanto chama a atenção o contorno do edifício em ambos os modelos. Pode

interpretar-se a partir destes resultados que a radiação refletida acaba por apresentar um peso mais significativo na fachada do edifício. Como tal, fizeram-se os levantamentos desses valores que estão indicados na Tabela 4.1.

Modelo	Telhado		Fachada			
	Norte	Sul	Norte	Sul	Este	Oeste
Shortwave	71	71	526	528	535	535
R.Sun	65	72	423	507	316	316

Unidades: Wh/m²/dia

Tabela 4.1 – Radiação refletida para um ano

Para eventuais estudos de radiação solar realizados nas fachadas de edifícios a radiação refletida pode ser uma componente de peso na radiação global.

4.6.4 Radiação global

Somando a radiação direta e a difusa, obtiveram-se os seguintes resultados para a água inclinada a sul (25°) (Fig. 4.33):

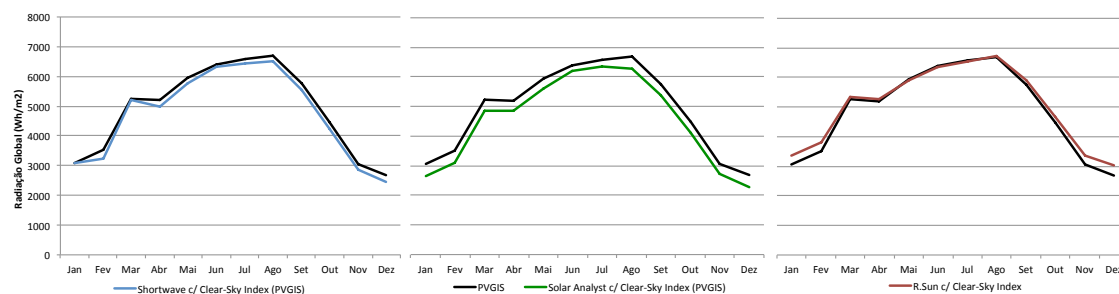


Figura 4.33 – Radiação global numa superfície com declive de 25°

Apesar das discrepâncias verificadas nas diferentes componentes. A sua soma traduziu-se num resultado bastante idêntico ao do PVGIS para todos os modelos. O que se afastou mais foi o *Solar Analyst*, que manteve uma diferença média de 300 Wh/m² ao longo de todos os meses. O *Shortwave* aproximou-se ligeiramente. O *R.Sun* apresentou as suas maiores diferenças nos meses de Janeiro, Fevereiro, Novembro e Dezembro, com uma diferença inferior a 300 Wh/m², acabando por ser o modelo que melhor representou a radiação global para a superfície inclinada de 25°.

Para a superfície inclinada de -25° obtiveram-se os resultados da Figura 4.34:

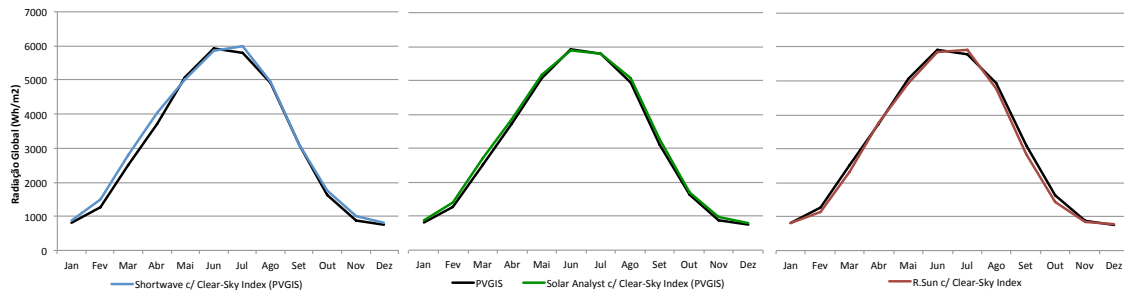


Figura 4.34 – Radiação global numa superfície com declive de -25°

Para a água do telhado virada a sul os valores obtidos foram, para todos os modelos, relativamente parecidos com os dados do PVGIS. Isto revela que para o *Shortwave* e *Solar Analyst* obtêm-se resultados parecidos para a radiação global, mas quando se pretende separar e identificar cada uma das componentes, não existe tanta coesão entre os resultados dos modelos.

4.7 Aplicação de um modelo à cidade de Coimbra

Com base no que já foi analisado, decidiu-se utilizar para esta simulação o modelo *R.Sun*. Apesar de não terem sido verificadas grandes diferenças relativamente aos resultados entre os modelos, este modelo mostrou utilizar parâmetros que se conhecem bem e mostrou estar muito integrado com os dados do PVGIS e uma vez que o *Clear-sky index* é estimado a partir dos dados do PVGIS, a escolha deste modelo pareceu ser conveniente.

4.7.1 Mapa de radiação solar

Os mapas produzidos pelo *R.Sun* para a cidade de Coimbra para o período de um ano estão apresentados nas Figuras 4.35 a) e 4.35 b) na componente da radiação direta e difusa, respectivamente. Foram produzidos separadamente dois mapas, um para cada componente, para que em cada um se pudesse aplicar um *Clear-sky index* médio anual com base nos valores do PVGIS (Secções 4.5.2.1 e 4.5.2.2):

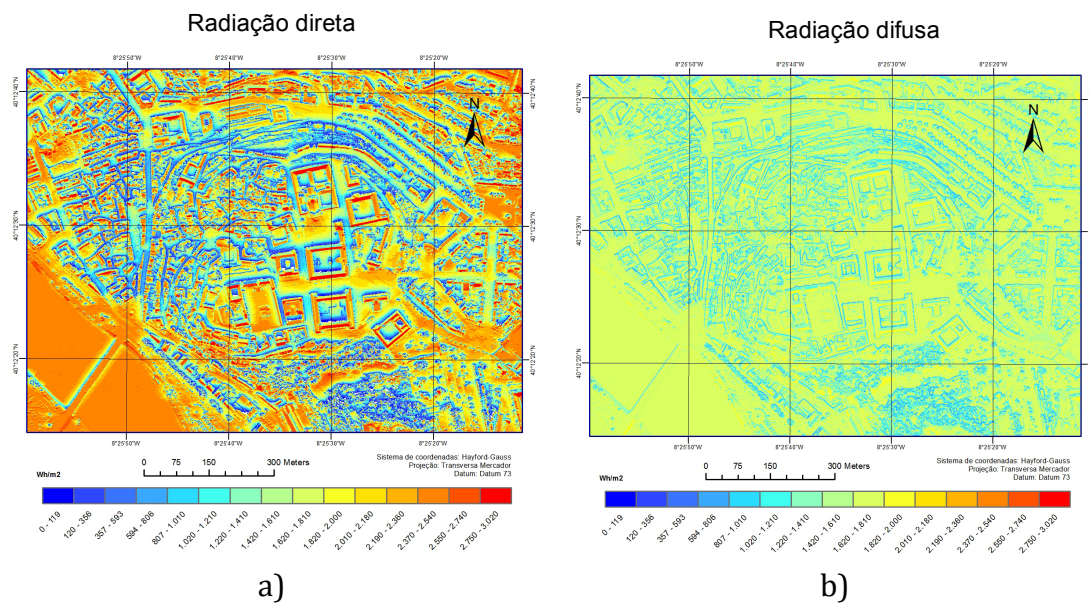


Figura 4.35 – Radiação solar na cidade de Coimbra para um ano: a) Componente direta; b) Componente difusa

Os valores obtidos dizem respeito à média anual da radiação direta (Figura 4.35 a) e da radiação difusa (Figura 4.35 b) e estão expressos em $\text{Wh}/\text{m}^2/\text{dia}$. Para cada componente foram necessárias 20 horas de processamento e considerou-se um intervalo incremental de uma hora (processo interativo de cálculo) para que se conseguissem obter resultados bastante precisos. Da soma das duas componentes resultou a radiação global (Figura

4.36).

Radiação global

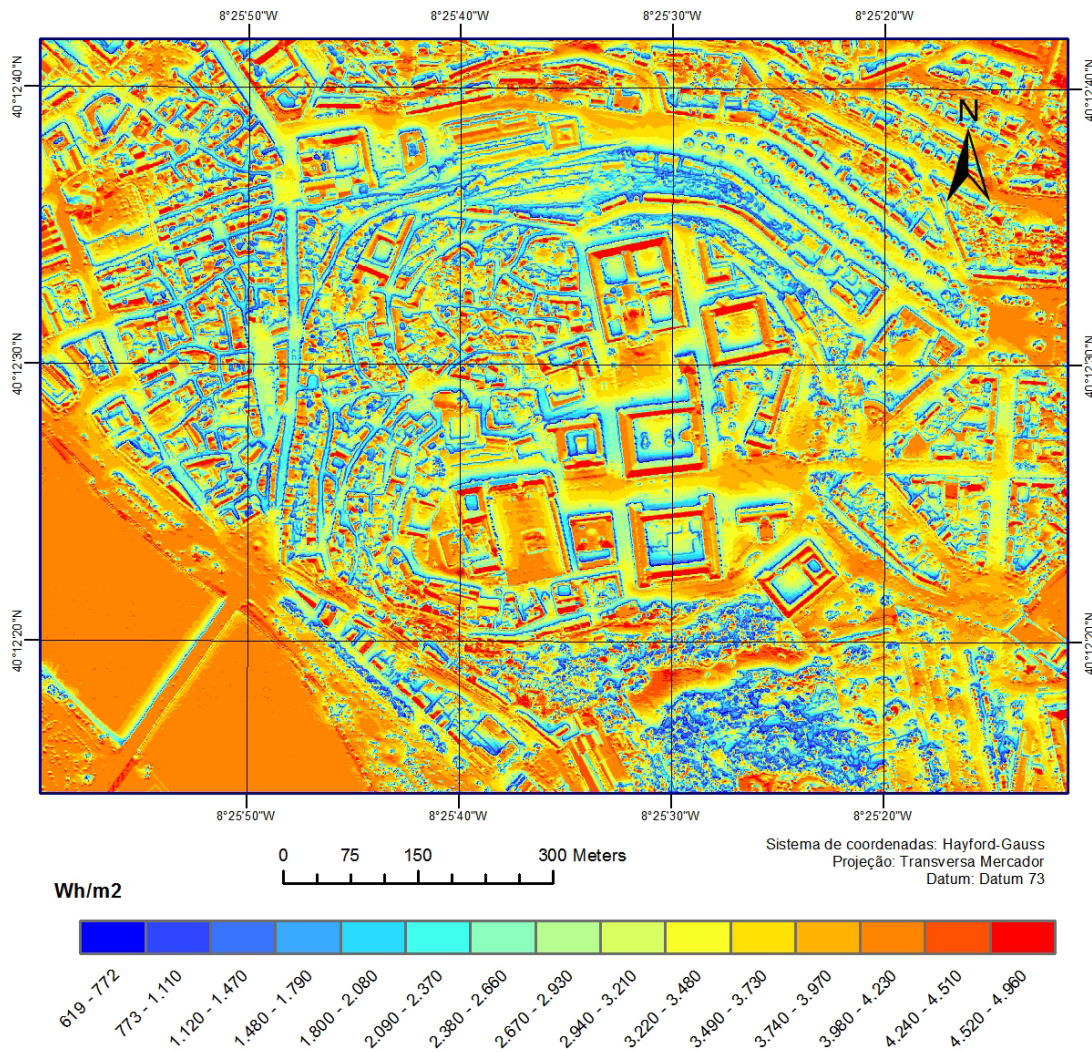


Figura 4.36 – Radiação global para a cidade de Coimbra

O mapa de radiação global parece ser bastante parecido com o mapa de radiação direta, no entanto, observando a legenda verificam-se valores significativamente superiores. Também se deixou de notar uma discrepância tão grande entre as zonas menos irradiadas, nomeadamente as áreas viradas a norte e as zonas mais irradiadas, principalmente as áreas viradas a sul (vê-se menos azul), isto porque a distribuição da radiação difusa é bastante mais uniforme no espaço do que a radiação direta. A complexidade deste mapa de radiação solar é de tal modo grande que todos os edifícios são facilmente identificáveis na figura.

4.7.2 Mapa das áreas reais

O mapa das áreas reais mostra a área ocupada por cada pixel e é obtida através da Equação 3.12 (Fig. 4.37):

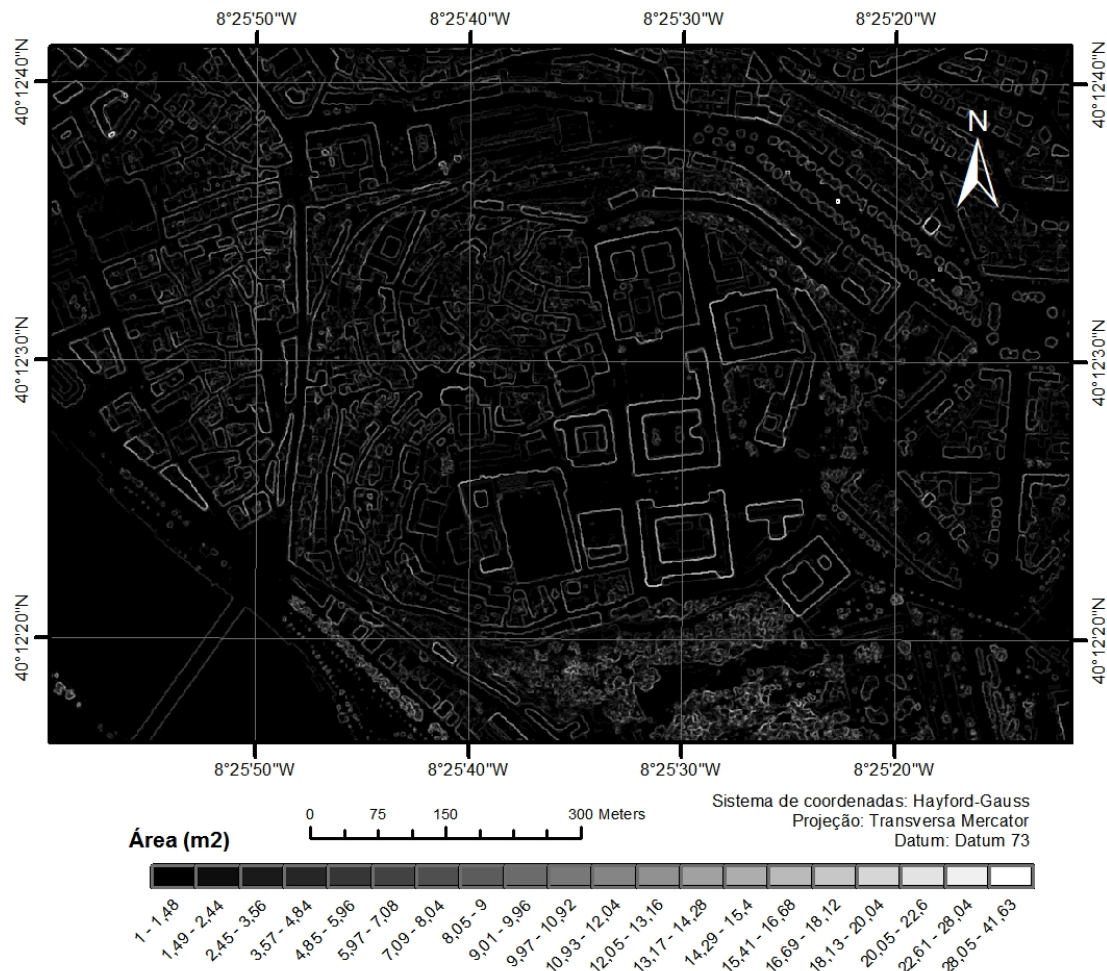


Figura 4.37 – Área real ocupada por cada pixel

Tal como mostra a figura, os limites dos edifícios acabam por ser bastante evidentes. De facto esses pixels representam grandes áreas, uma vez que representam as fachadas dos edifícios ou declives muito acentuados. Os pixels que representam áreas menores serão aqueles que dizem respeito a superfícies planas.

No entanto, pretende-se somar no mapa de área reais, todos os pixels que pertençam a cada água de telhado através da cartografia de cada edifício da Universidade de Coimbra (Fig. 3.3) para que se obtenha a área real de cada água de telhado. Os limites dos edifícios no mapa de áreas reais podem condicionar negativamente os resultados finais do potencial, uma vez que um pequeno desfasamento com a cartografia pode fazer com que

se utilize esses valores dos limites que dizem respeito às fachadas e não às coberturas. Para evitar esse problema removeram-se a partir do mapa de declive S todos os ângulos superiores a 75° .

4.7.3 Mapa do potencial energético solar

Com todos os dados disponíveis para o cálculo do potencial, obtiveram-se os seguintes resultados por água de telhado (Fig. 4.38):

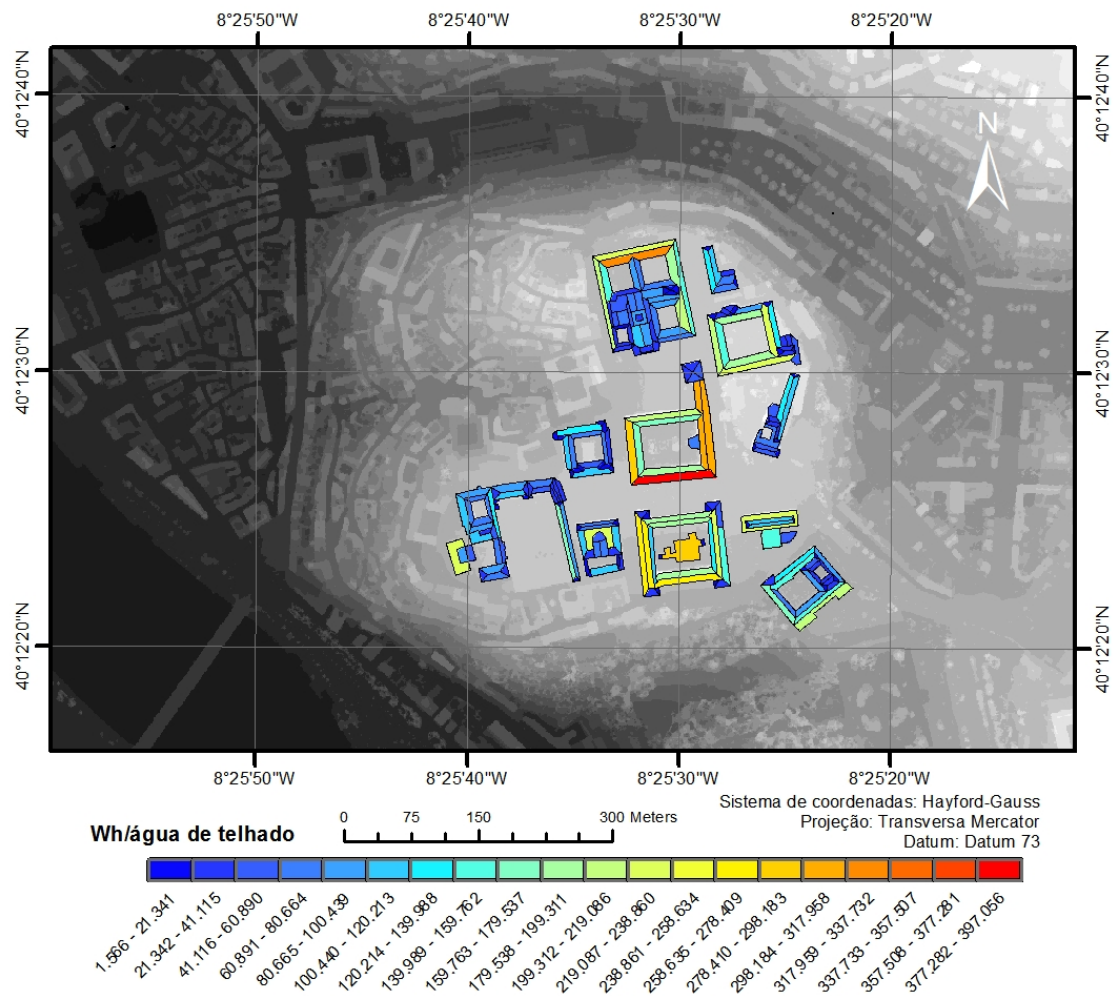


Figura 4.38 – Mapa do potencial energético solar para cada água de telhado

Com este mapa pode identificar-se a capacidade de gerar energia que tem cada água de telhado. O mapa fornece a média anual dos níveis de radiação global em Wh/dia. E também por edifício (Fig. 4.39):

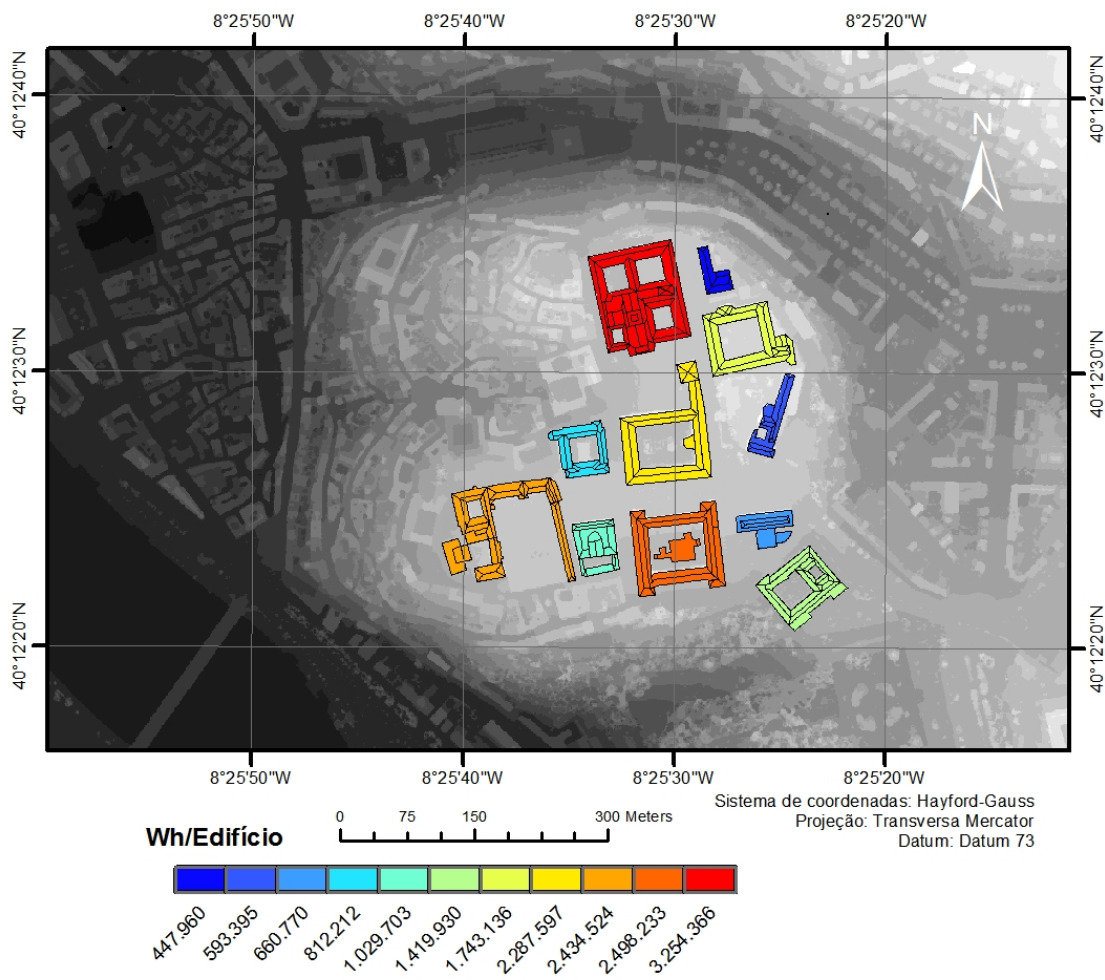


Figura 4.39 – Mapa do potencial energético solar para cada edifício

A Figura 4.39 mostra que os edifícios maiores terão obviamente maior potencial, no entanto essa figura não será útil pela análise comparativa entre os edifícios, mas pelo valor do potencial que pode ser obtido por cada edifício. Por exemplo, o Laboratório Químico tem um potencial total de 448 kWh por dia e a Faculdade de Medicina tem 2289 kWh por dia. Se considerarmos o preço do kWh a 0.10 € teremos uma média diária de benefício igual a 44.80 € e 228.90 €, respectivamente.

5 CONCLUSÕES

Vários métodos foram utilizados para testar os modelos matemáticos *Shortwave*, *Solar Analyst* e *R.Sun*. Começou-se por avaliar as fórmulas utilizadas por cada modelo com o intuito de encontrar o significado e importância dos parâmetros utilizados por cada um, depois o seu comportamento numa superfície plana horizontal, de seguida num edifício simples e por fim nas condições reais e complexas do meio urbano. A esta análise juntou-se a parametrização do *Clear-sky index* que se mostrou fundamental para determinar a radiação solar em condições de céu reais.

Na avaliação feita aos parâmetros, verificou-se que o *R.Sun* é o único modelo que faz referência à refração atmosférica e de facto a comparação entre as massas de ar dos modelos mostrou valores inferiores para o *R.Sun*. Essas diferenças parecem ter-se estendido até à fórmula da transmitância atmosférica, fazendo com que o *R.Sun* voltasse a mostrar resultados diferentes dos outros modelos. Os parâmetros específicos utilizados pelo *Solar Analyst* e o *R.Sun*, τ e T_{LK} , respectivamente, também dificultaram um pouco a análise da transmitância atmosférica tendo-se estabelecido para estes parâmetros os valores que mais faziam estes modelos se aproximarem do *Shortwave*. Só assim se poderia confirmar se a transmitância atmosférica iria ser o parâmetro fundamental no cálculo da radiação direta. Pode ainda comprovar-se que a altitude z , utilizada nas fórmulas para a massa de ar do *Solar Analyst* e do *R.Sun*, não é muito sensível a pequenas variações, tal que o *Shortwave* nem a considera.

No primeiro teste feito com modelos para simular a radiação direta, o *Solar Analyst* apresentou resultados muito diferentes do esperado. Afinal o parâmetro τ definido para que a transmitância atmosférica fosse igual entre os modelos não fez com que os resultados para a radiação direta fossem semelhantes entre o *Solar Analyst* e os outros modelos. A descrição feita pelos autores é pouco clara relativamente às fórmulas e procedimento utilizados pelo mesmo. Apesar de se terem verificado algumas diferenças entre as transmitâncias do *Shortwave* e do *R.Sun*, o *Shortwave* apresentou um resultado semelhante ao *R.Sun* para a radiação direta. Para a radiação difusa, os resultados foram muito diferentes entre os modelos o que acabou por ser esperado, porque as fórmulas e abordagem feita a esta componente é muito diferente. Outra situação interessante que se verificou é que a radiação difusa é também maior nos meses quentes, apesar de não registar uma variação tão grande ao longo do ano como a radiação direta. Isto acontece porque apesar da nebulosidade poder contribuir para o aumento da radiação difusa face à

radiação direta, são as poeiras e outros gases existentes na atmosfera em maior quantidade nos meses quentes que de facto contribuem para o aumento dos níveis de radiação difusa nesta época.

Na comparação dos modelos com os dados da estação meteorológica, todos os modelos apresentaram resultados bastante satisfatórios para a radiação direta quando utilizados com o *Clear-sky index* fornecido pela própria estação. Destaca-se a proximidade dos resultados do *R.Sun*. Neste ponto, verificou-se que facilmente se pode aplicar um *Clear-sky index* a qualquer um dos modelos para obter os resultados da radiação solar para as condições reais, apesar de apenas o *R.Sun* vir descrito pelos seus autores como sendo um modelo que considera essas condições. O *Solar Analyst* evidenciou uma característica não verificada nos outros modelos. Ao utilizar os parâmetros predefinidos pelo modelo ($\tau_a = 0.5$ e $\tau_f = 0.3$) obtiveram-se resultados próximos dos dados pela estação meteorológica tanto para a radiação direta como para a radiação difusa sem utilizar um *Clear-sky index*. Isto revela que o modelo original já vem de certo modo preparado para simular as condições reais, ao contrário do que se esperava. Inicialmente, esperava-se que a radiação direta apresentasse uma grandeza bem maior que as restantes componentes. No entanto, a partir do momento que se considerou as condições reais, a radiação difusa mostrou que perante alguns cenários pode ser maior que a radiação direta.

Quando comparados os dados do PVGIS com os dados da estação para uma superfície horizontal, verificou-se que os dados são muito idênticos para todo o ano, o que mostrou alguma coesão entre a informação disponível destas duas fontes. Foi feita uma análise aos dados do PVGIS para várias inclinações e pode verificar-se que de facto existem para ambas as componentes da radiação solar variações muito significativas quando o Sol atinge superfícies com inclinações diferentes. Existe até um período do ano em que uma superfície horizontal é mais irradiada do que uma superfície com inclinação de 25° virada a sul. Daí a importância de utilizar um modelo matemático. Só um modelo matemático tem capacidade para simular a radiação solar numa complexa área urbana e considerando um conjunto vasto de variáveis, nomeadamente a variação da inclinação das coberturas (ou declive do terreno) e a sua exposição.

Ao parametrizar-se o *Clear-sky index* para Coimbra verificou-se a existência de uma correlação forte entre o *Clear-sky index* da radiação direta e o $\frac{D}{G}$ que é disponibilizado pela estação e também pelo PVGIS, principalmente para o *R.Sun* quando este considerou um T_{LK} variável. A utilização de um T_{LK} Variável no *R.Sun* mostrou ser fundamental, uma vez que assim se obtiveram correlações muito fortes, o que confirma a fiabilidade

dos dados fornecidos pela estação meteorológica e o PVGIS e os resultados obtidos pelo *R.Sun*. Derivado dessa forte correlação podem estimar-se para a região de Coimbra os *Clear-sky index* da radiação direta a partir das Equações 4.1 ou 4.2, utilizando o $\frac{D}{G}$ disponibilizado pela estação meteorológica ou pelo PVGIS, respectivamente. O *Clear-sky index* parametrizado para a radiação difusa não apresenta qualquer relação entre os modelos e outros parâmetros. Tal já seria de esperar dado que já se tinha verificado a diferente forma de cálculo utilizada pelos modelos para a radiação difusa. Para esta situação resta utilizar o valor do *Clear-sky index* da radiação difusa obtido para cada mês. Os *Clear-sky index* obtidos para a radiação difusa através dos dados da estação e do PVGIS foram bastantes semelhantes (Figs. 4.19 e 4.24).

No cálculo da radiação solar para um edifício simples confirmou-se que o *Clear-Sky index* parametrizado para uma superfície horizontal é também bastante aceitável quando utilizado noutras inclinações. Para a radiação direta, verificou-se que os resultados obtidos para a cobertura do edifício são parecidos entre os modelos, no entanto o mesmo não se verificou para a área envolvente, nomeadamente para o *R.Sun* que apresentou algumas deficiências no cálculo das sombras que parecem ter influenciado essas diferenças. O problema foi aparentemente solucionado quando se utilizou um MDS de maiores dimensões. Comparando os dados do PVGIS disponíveis com as duas águas do telhado do edifício, registaram-se para a radiação direta em ambas as águas, valores muito parecidos, nunca superiores a 500 Wh/m^2 . Para a radiação difusa não se verificou uma proximidade tão grande dos resultados obtidos pelo *Shortwave* e *Solar Analyst* com os dados do PVGIS, como para o *R.Sun* que coincidiu com o PVGIS para a água virada a sul e manteve-se próximo também para água virada a norte. A abordagem do PVGIS aproxima-se do *R.sun*, o que não é de estranhar, uma vez que o PVGIS utiliza o *R.Sun* como referência para modelar a radiação solar e verifica-se a diferença de abordagem feita pelo *Shortwave* e *Solar Analyst*. Curiosamente, para a radiação difusa, o *Shortwave* e o *Solar Analyst* apresentaram para as duas águas do telhado do edifício curvas iguais ao longo de todo o ano, o que é estranho visto a área envolvente do edifício ser bastante diferente entre estes modelos para esta componente. A radiação refletida é praticamente insignificante nas coberturas, sendo que o mesmo não se pode dizer nas fachadas dos edifícios. Será interessante estudar esta componente em trabalhos futuros. Os gráficos da radiação global para as duas águas do telhado mostraram que os resultados obtidos pelos modelos em relação ao PVGIS são muito idênticos. Conclui-se portanto que a separação da componente da radiação direta e difusa no *Shortwave* e do

Solar Analyst não segue a mesma forma que no *R.Sun* e também no PVGIS. Talvez por isso a correlação obtida pelo $\frac{D}{G}$ e o *Clear-sky index* estimado para o *R.Sun* tenham sido tão fortes. Relembro que dados do PVGIS relativamente à radiação difusa não são diretamente adquiridos. É utilizado $\frac{D}{G}$ para obter a quantidade de radiação difusa a partir da radiação global (Eq. 3.6).

Por último, mais alguma notas soltas. O *Shortwave* apenas deve ser aplicado em pequenas áreas por causa da latitude que entra no modelo com um único valor para todo o MDS. A fraca resolução espacial do MDS (1 metro) limitou o estudo de edifícios com menores dimensões. O *R.Sun* mostrou ser o melhor modelo perante todas as análises realizadas.

6 BIBLIOGRAFIA

Referências a artigos em publicações periódicas:

ALMEIDA, L., PERDIGÃO, M., e FRANCISCO, N., 2005, Painéis solares activos - Trabalho final de Mestrado, Departamento de Engenharia Electrónica da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal

AKBARI, H. and A. DESJARLAIS, 2007, Online article: Cooling Down the House - Residential roofing products soon will boast "cool" surfaces. National Roofing Contractors Association.

CAÑADA, J. , 1992, Determination of Angstrom's Turbidity Coefficient at Valencia, Valencia, Spain

HOFIERKA, J.; SURY, M., 2002, The solar radiation model for Open Source GIS: implementation and applications, Open Source GIS - GRASS Users Conference 2002 Proceedings, Trento, Italy. [R.sun]

HOFIERKA, J.; KANUK, J., 2009, Assessment of photovoltaic potencial in urban areas using open-source solar radiation tools, Presov, Slovak Republic

JACKSON, T. L., FEDDEMA, J. J., OLESON, K. W., BONAN, G. B., and BAUER, J. T., 2010, Parameterization of urban characteristics for global climate modeling. Annals of the Association of American Geographers Special Issue on Climate Change 2010.

LEVINSON, R. and A. HASHEM., 2001, Effects of Composition and Exposure on the Solar Reflectance of Portland Cement Concrete. Lawrence Berkeley National

KUMAR, L., SKIDMORE, A.K. e KNOWLES, E., 1997, Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. International Journal of Geographical Information Science, 11, p. 475–497. [Shortwave]

REMUND J., WALD L., LEFEVRE M., RANCHIN T., PAGE J., 2003, Worldwide Linke turbidity information. Proceedings of ISES Solar World Congress, 16-19 June 2003, Göteborg, Sweden.

YU, B., LIU, H., WU, J. e LIN, W., 2009. "Investigating impacts of urban morphology on spatio-temporal variations of solar radiation with airborne LiDAR data and a solar flux model: a case study of downtown Houston," International Journal of Remote Sensing [Shortwave]

Referências a livros e manuais:

AHRENS, C. D., 2006. Meteorology Today. An Introduction to Weather, Climate, and the Environment. Eighth Edition. Thompson, Brooks/Cole. United States. 537 pp.

BERDAHL, P. and S.E. BRETZ., 1997, Preliminary Survey of the Solar Reflectance of Cool Roofing Materials. Energy and Buildings 25: 149-158.

DUFFIE, J.A. and BECKMAN, W.A., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes (New York: Wiley-Interscience).

FU, P., and P. M. RICH, 2000, The Solar Analyst 1.0 Manual. Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), USA [Solar Analyst]

GATES, D. M., 1980, Biophysical Ecology (New York: Springer-Verlag)

JENNESS, J. , 2012, DEM Surface Tools for ArcGIS

KREITH, F., and KREIDER, J. F., 1978, Principles of Solar Engineering (New York: McGrawHill).

OKE, T.R. 1987. Boudary Layer Climates, 2nd edition. Methuen: New York.

RENEWABLES 2012,

– Global Status Report, REN 21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century

REPAP 2020, Renewable Energy Policy Action Paving the Way towards 2020

SCHARMER, K. and GREIF J., 2000, The European Solar Radiation Atlas Vol. 1: Fundamentals and Maps, Paris, France

Referências a páginas na internet:

DIRECÇÃO GERAL DE ENERGIA E GEOLOGIA,

<http://www.dgge.pt>

(acedido a 15 de Junho de 2012)

PVGIS, Joint Research Centre, Institute for Energy, Renewable Energy Unit, European Commission,

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>

(acedido a 7 de Junho de 2012)

SODA, Solar Energy Services for Professionals, Linke Turbidity Factor Webservice,

<http://www.soda-is.com/>

(acedido a 12 de Junho de 2012)

WIKIPÉDIA,

http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_solar

(acedido a 5 de Junho de 2012)

http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell_efficiency

(acedido a 5 de Junho de 2012)

ZIMMERMANN, N.E., 2001, Calculation of direct, diffuse and reflected solar radiation

– Shortwave model. Disponível em:

<http://www.wsl.ch/staff/niklaus.zimmermann/programs/aml.html>

(acedido a 5 de Junho de 2012)

ANEXO A – Dados climatológicos do período de 1961-1990 da estação meteorológica de Coimbra, excepto os dados de nebulosidade que são do período de 1971-2000

Vento		Precipitação				Radiação			Evap. Piche 09h-09h (mm)	Humid. Relativa (%)	Temp. (°C) Média	Pressão (mb) Média
Duração (h)	Dirrec. Domin.	Vcl. média (Km/h)	Nº de dias	Total acumulado (mm)	Acumulada (09:00-09:00) (mm)	00:00-24:00 (mm)	09:00-09:00 (mm)	Global (méd.) (cal/m2)	Difusa (méd.) (cal/m2)	Insoleção Média (h)	Nebul.* (0-10)	
123.7	SE	10.3		137.7	137.8		137.8	177	75	4.4	5	1003.6
96.3	SE	10.6	15	277.9	278.1	140.2	140.3	238	104	4.8	6	1001.2
115.1	NW	10.0	14	365.4	366.6	87.5	88.5	359	141	6.2	5	1001.4
149.0	NW	8.9	14	456.5	457.0	91.1	90.4	442	178	5.1	6	998.7
205.8	NW	8.9	12	534.5	535.6	78.0	78.6	510	197	8.0	6	999.6
205.4	NW	8.4	9	584.5	587.0	50.0	51.4	553	203	8.7	5	1000.4
263.4	NW	8.2	5	597.1	600.6	12.6	13.6	575	183	9.7	4	1001.0
234.1	NW	8.3	5	610.0	613.5	12.9	12.9	531	159	9.7	4	1000.7
137.9	NW	7.7	8	658.2	661.3	48.2	47.7	410	148	7.5	5	1001.0
119.6	NW	8.5	13	757.1	757.7	98.9	96.4	288	116	6.0	6	1000.8
103.7	SE	9.4	14	884.5	886.6	127.4	128.9	198	81	4.9	6	1001.3
110.6	SE	10.4	14	1013.6	1016.6	129.1	129.9	160	67	4.5	6	1003.0
		9.2	141	1013.6	1016.6	1018.6	1016.9	370	138	6.8	5	1001.1

ANEXO B – Valores mensais de radiação solar na estação meteorológica de Coimbra obtidos pelo PVGIS



Photovoltaic Geographical Information System

Incident global irradiation for the chosen location

Location: 40°12'29" North, 8°24'44" West, Elevation: 120 m a.s.l.,

Optimal inclination angle is: 33 degrees

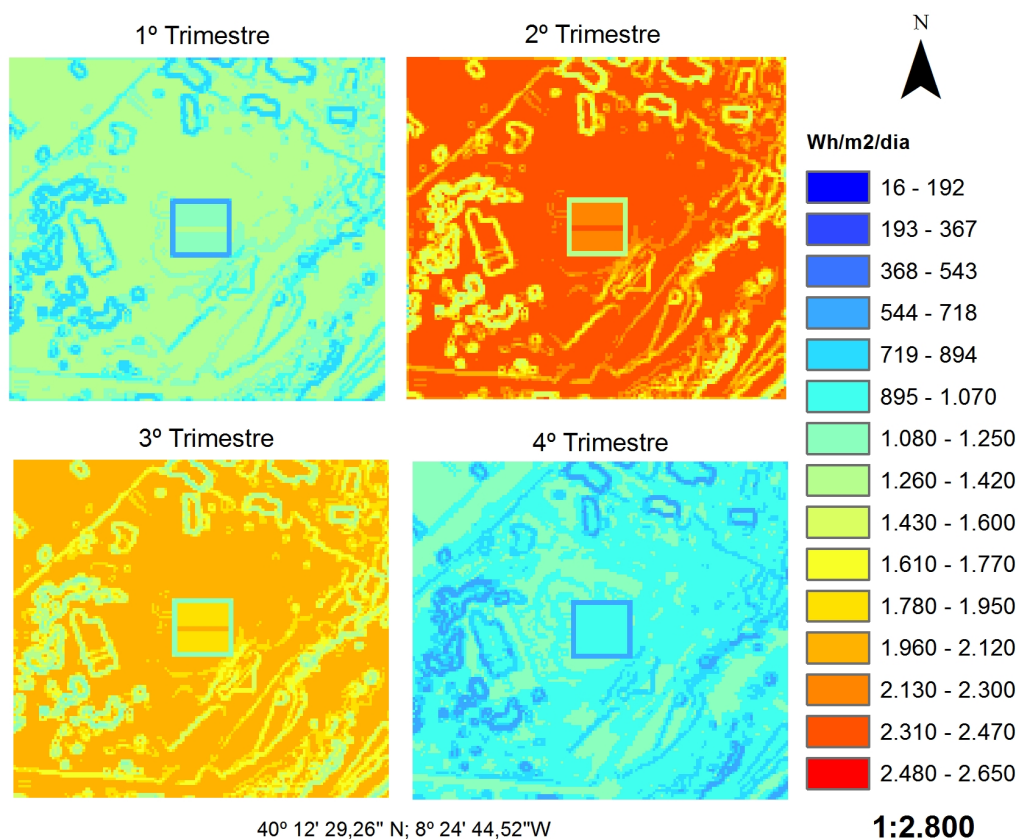
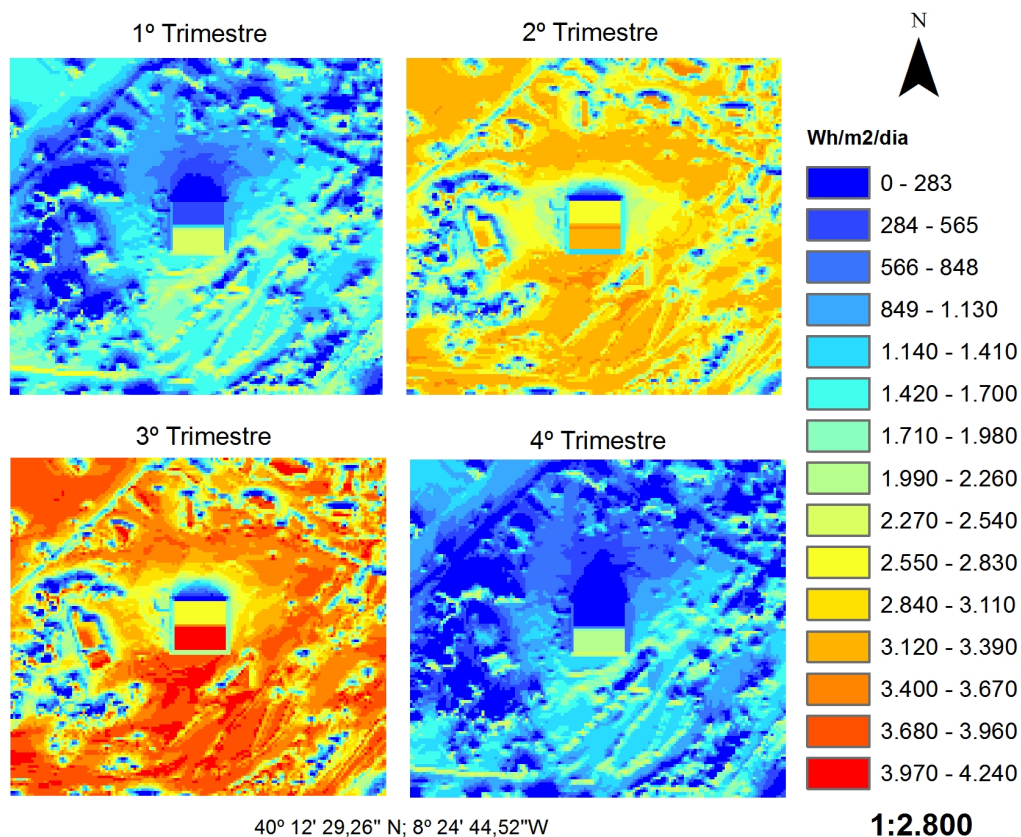
Annual irradiation deficit due to shadowing (horizontal): 0.3 %

Month	Hh	Hopt	H(25)	lopt	TL	D/G	T24h	NDD
Jan	1950	3150	2930	62	2.5	0.48	9.7	221
Feb	2570	3580	3410	53	2.7	0.50	10.6	178
Mar	4240	5310	5170	43	2.8	0.40	13.2	101
Apr	4840	5170	5200	26	3.0	0.46	14.3	93
May	6000	5850	6010	13	3.5	0.42	16.9	22
Jun	6740	6270	6520	6	3.4	0.38	20.6	2
Jul	6780	6450	6670	10	3.6	0.36	22.2	1
Aug	6370	6640	6730	22	3.1	0.33	22.5	2
Sep	4850	5790	5690	38	3.3	0.35	20.3	14
Oct	3320	4560	4360	51	3.1	0.41	17.2	59
Nov	2050	3120	2920	59	2.5	0.50	12.8	189
Dec	1670	2750	2540	64	2.3	0.51	10.3	218
Year	4290	4900	4850	33	3.0	0.40	15.9	1100

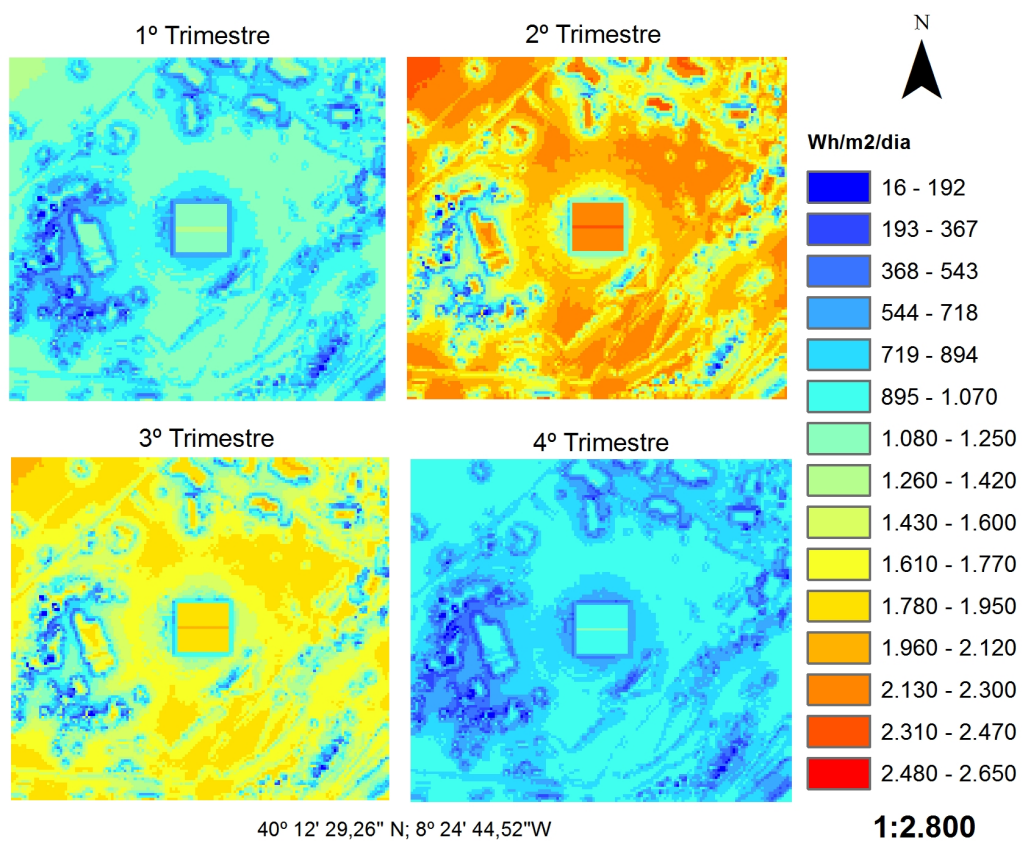
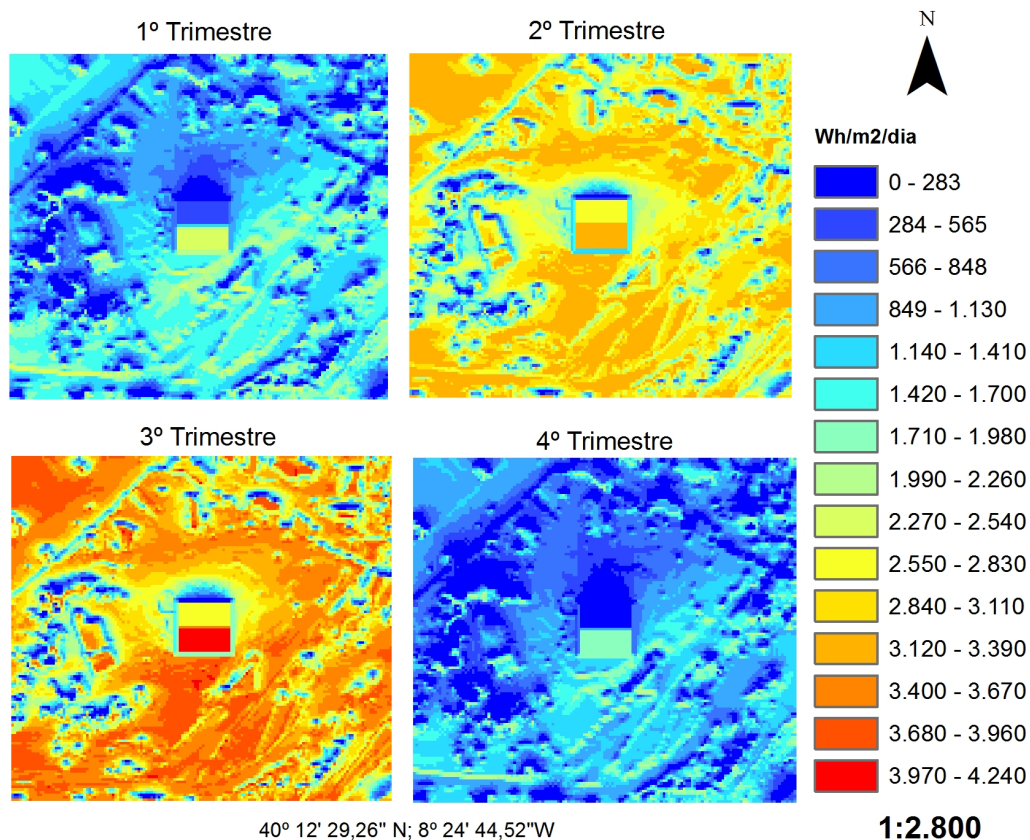
Hh: Irradiation on horizontal plane (Wh/m2/day)
 Hopt: Irradiation on optimally inclined plane (Wh/m2/day)
 H(25): Irradiation on plane at angle: 25deg. (Wh/m2/day)
 lopt: Optimal inclination (deg.)
 TL: Linke turbidity (-)
 D/G: Ratio of diffuse to global irradiation (-)
 T24h: 24 hour average of temperature (°C)
 NDD: Number of heating degree-days (-)

PVGIS (c) European Communities, 2001-2010
 Reproduction is authorised, provided the source is acknowledged.
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

ANEXO C – Mapas de radiação direta e difusa de um edifício e área envolvente obtidos pelo *Shortwave*



ANEXO D – Mapas de radiação direta e difusa de um edifício e área envolvente obtidos pelo *Solar Analyst*



ANEXO E – Mapas de radiação direta e difusa de um edifício e área envolvente obtidos pelo R.Sun

