



**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**  
**ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**Início da medição e análise da radiação solar  
direta normal no Alentejo**

**Nelson Miguel Pucarinho da Luz**

Orientação: Professor Doutor Manuel Collares  
Pereira

**Mestrado em Engenharia da Energia Solar**  
Dissertação

Évora, 2014





**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**  
**ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**Início da medição e análise da radiação solar  
direta normal no Alentejo**

**Nelson Miguel Pucarinho da Luz**

Orientação: Professor Doutor Manuel Collares  
Pereira

**Mestrado em Engenharia da Energia Solar**  
Dissertação

Évora, 2014

## **Agradecimentos**

Começo por agradecer aos meus Pais por todas as oportunidades que me concederam, por toda a educação e valores que me transmitiram, e continuam a transmitir, e por toda a motivação e apoio incondicional. Agradeço também há minha Irmã e em especial há minha Namorada por toda a paciência, motivação e apoio incondicional.

Um grande e especial agradecimento ao meu orientador da presente Dissertação de Mestrado, Prof. Dr. Manuel Collares Pereira, pela oportunidade única que me concedeu de ter o privilégio de trabalhar consigo, e por toda a dedicação e aprendizagem que me transmitiu.

Deixo um grande abraço de agradecimento a todos os meus verdadeiros Amigos de infância pelo encorajamento e vivências passadas que me fizeram crescer enquanto pessoa e dar valor ao que realmente importa.

Agradeço também a todos os meus colegas de trabalho da Cátedra BES – ER pelo excelente ambiente de trabalho e pela convivência e aprendizagem. Aos meus colegas de curso Afonso Cavaco e Ricardo Pereira pela troca de ideias e discussões que em muito contribuíram para a minha aprendizagem.

Aproveito a oportunidade para agradecer também ao Prof. Heitor Reis e ao Prof. Paulo Canhoto por toda a dedicação e aprendizagem que me transmitiram ao longo do meu percurso académico.

Por fim dedico esta Dissertação e todo o meu percurso aos meus Pais, Irmã, Namorada, Avós e ao meu falecido Avô, Bisavó e Madrinha.

## Resumo

A Dissertação consiste no início da medição e análise do potencial solar no Alentejo, com especial ênfase para o estudo da Radiação solar DNI, com o objetivo de efetuar o seu mapeamento solar.

Para este estudo foram instaladas sete estações meteorológicas com piranómetros e uma estação central com dois piranómetros e um pireliómetro para medição de todas as componentes da Radiação solar no Alentejo.

Através das medidas efetuadas nas estações, durante seis meses, efetuou-se a comparação com os dados de Évora para aumentar o seu significado estatístico. Efetuou-se também o estudo de correlações existentes, recorrendo à comparação dos dados numéricos obtidos a partir das correlações com os dados numéricos medidos nas oito estações meteorológicas.

Como apenas uma das estações dispõe de pireliómetro, é necessário estender a rede de medição a uma série de pireliómetros por todo o Alentejo. Isso constitui o tema de uma candidatura ao QREN, que foi apresentada.

## **Abstract**

### **Startup of the measurement and analysis of direct normal of solar radiation in Alentejo.**

The Dissertation consists in the measurement and analysis of the solar potential in the Alentejo, with special emphasis on the study of solar Radiation DNI, with the goal of making it's solar mapping.

For this study were installed seven meteorological stations equipped with pyranometer and a central station equipped with two pyranometers and one pyrhelimeter, to make the measurement of all components of solar Radiation in the Alentejo.

Through the measures made at the stations for six months and the comparison with the data of Évora, we can increase the statistical significance of data. It was also made the study of the existing correlations, consisting in comparing the calculations based on the correlations with the numeric data measured at the eight meteorological stations.

Because only one of the stations has pyrhelimeter, it is necessary to extend the measurement network to several pyrhelimeters across the Alentejo. This is the theme of the QREN candidature, which was already presented.



# Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Índice.....	v
Lista de Quadros.....	vii
Lista de Figuras.....	viii
Nomenclatura.....	xii
Lista de abreviaturas.....	xvi
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Energia, qual o futuro?.....	1
2 Ângulos, Radiação e sensores solares.....	6
2.1 Ângulos solares.....	6
2.1.1 Declinação solar ( $\delta$ ).....	6
2.1.2 Equação do tempo (ET).....	7
2.1.3 Ângulo horário ( $w$ ).....	8
2.1.4 Ângulo solar Zenital ( $z$ ) e ângulo da altitude solar ( $\gamma$ ).....	9
2.1.5 Ângulo solar Azimutal ( $\alpha$ ).....	9
2.1.6 Ângulo de nascer e pôr-do-sol ( $w_s$ ).....	10
2.1.7 Ângulo de incidência ( $\theta$ ).....	11
2.2 Radiação solar.....	12
2.2.1 Irradiação solar extraterrestre ( $H_0$ ).....	12
2.2.2 Irradiação solar Terrestre.....	13
2.3 Sensores de Radiação solar.....	14
2.3.1 Piranómetro.....	14
2.3.2 Pireliómetro.....	17
2.3.3 Sensor de Duração da luz solar.....	18
3 Projeto RETALER II.....	21
3.1 Descrição da Operação.....	21
3.1.1 Localização da Operação.....	21
3.1.2 Estações Meteorológicas.....	22
3.2 Localização correta dos piranómetros.....	28
3.3 Calibração das Estações Meteorológicas.....	31
3.4 Análise da Radiação solar Global.....	35
3.4.1 Agosto.....	36
3.4.2 Setembro.....	40
3.4.3 Outubro.....	44

3.4.4	Novembro.....	47
3.4.5	Dezembro.....	50
3.4.6	Análise semestral .....	54
3.5	Estudo das correlações da Radiação solar Difusa.....	58
3.5.1	Metodologia utilizada para o estudo .....	58
3.5.2	Análise das correlações e resultados .....	64
3.6	Análise da Radiação solar Difusa .....	68
3.6.1	Agosto .....	68
3.6.2	Setembro.....	70
3.6.3	Outubro .....	71
3.6.4	Novembro.....	73
3.6.5	Dezembro.....	74
3.6.6	Análise semestral .....	76
3.7	Estudo das correlações da Radiação solar DNI.....	78
3.7.1	Calibração relativa do pireliómetro.....	78
3.7.2	Metodologia utilizada para o estudo .....	81
3.7.3	Análise das correlações e resultados .....	85
3.8	Análise da Radiação solar DNI .....	87
3.8.1	Agosto .....	87
3.8.2	Setembro.....	89
3.8.3	Outubro .....	91
3.8.4	Novembro.....	92
3.8.5	Dezembro.....	94
3.8.6	Análise semestral .....	95
4	Projeto DNI .....	98
4.1	Fundamentação.....	98
4.2	Objetivos específicos do Projeto.....	100
4.3	Pertinência da sua realização.....	101
5	Conclusões .....	102
6	Referências Bibliográficas.....	104

## Lista de Quadros

Quadro 1 - Coordenadas das estações meteorológicas instaladas em cada Município. ....	22
Quadro 2 - Lista de equipamentos instalados. ....	28
Quadro 3 – Coeficientes para a base definida pelo Piranómetro da UE.....	35
Quadro 4 - Resultados obtidos para $K_T$ e $K_d$ em Portalegre durante o período compreendido entre o dia 1/11/2013 até 09/01/2014. ....	61
Quadro 5 – Resultado dos parâmetros estatísticos para cada correlação.....	66
Quadro 6 – Valores de $K_T$ e Irradiação solar DNI em Portalegre durante o período compreendido entre o dia 1/11/2013 até 09/01/2014. ....	82
Quadro 7 – Resultados dos parâmetros estatísticos para as duas correlações em estudo. ....	85

## Lista de Figuras

Figura 1 - Consumo Mundial anual de Energia Primária, 2005 – 2030. Adaptado de [1].	2
Figura 2 - Crescimento da População Mundial, 2005 – 2030. Adaptado de [2].	2
Figura 3 - Distribuição percentual da Radiação solar incidente [4].	4
Figura 4 - Movimento anual da Terra relativamente ao sol [6].	6
Figura 5 - Variação da Declinação solar ao longo do ano [6].	6
Figura 6 - Variação da ET, em minutos, ao longo do ano [8].	8
Figura 7 - Representação do ângulo horário ( $w$ ), Declinação solar ( $\delta$ ) e latitude ( $\lambda$ ).	8
Figura 8 - Representação do ângulo solar Zenital ( $z$ ), ângulo da altitude solar ( $Y$ ) e ângulo solar azimutal ( $\alpha$ ). Adaptado de [9].	10
Figura 9 - Piranómetro CMP3 da <i>Kipp &amp; Zonen</i> – Segunda Classe [13].	15
Figura 10 - Anel de sombreamento estático – ajuste sazonal [14].	15
Figura 11 - Sistema autónomo de seguimento do sol a dois eixos – <i>Sun Tracker Solys 2 (Kipp &amp; Zonen)</i> [15].	16
Figura 12 - Imagem em corte de um piranómetro e indicação dos seus constituintes [14].	17
Figura 13 - Pireliómetro CHP1 ( <i>Kipp &amp; Zonen</i> ) [16].	17
Figura 14 - Diagrama de montagem do ‘sensor de duração da luz solar’ [18].	18
Figura 15 - Sensor de Campbell – Stokes [19].	19
Figura 16 - Exemplo de cartões de registo da duração do dia solar [20].	20
Figura 17 - Localização geográfica das estações meteorológicas.	21
Figura 18 - Estação meteorológica de Portalegre.	22
Figura 19 - Orientação Este da Base do <i>Solys 2</i> .	23
Figura 20 - Alinhamento do pireliómetro com o centro da imagem solar.	23
Figura 21 - Sistema de aquisição de dados da estação meteorológica de Portalegre.	24
Figura 22 - Estação meteorológica de Alter do Chão.	25
Figura 23 - Estação meteorológica de Arronches.	25
Figura 24 - Estação meteorológica de Avis.	25
Figura 25 - Estação meteorológica de Campo Maior.	26
Figura 26 - Estação meteorológica de Gavião.	26
Figura 27 - Estação meteorológica de Marvão.	26
Figura 28 - Estação meteorológica de Sousel.	27
Figura 29 - <i>Meteon</i> – Sistemas de aquisição de dados das estações periféricas.	27
Figura 30 - Exemplo de obstrução dos raios solares.	29
Figura 31 – Exemplo de reflexão dos raios solares.	29
Figura 32 – Correta e nova localização da estação de Sousel.	30
Figura 33 – Correta e nova localização da estação de Avis.	30
Figura 34 – Gráfico com os resultados da calibração efetuada em Alter do Chão.	32
Figura 35 – Gráfico com os resultados da calibração efetuada em Sousel.	32
Figura 36 – Gráfico com os resultados da calibração efetuada em Avis.	32

Figura 37 – Gráfico com os resultados da calibração efetuada em Gavião. ....	33
Figura 38 – Gráfico com os resultados da calibração efetuada em Arronches. ....	33
Figura 39 – Gráfico com os resultados da calibração efetuada em Campo Maior. ....	33
Figura 40 – Gráfico com os resultados da calibração efetuada em Portalegre. ....	34
Figura 41 – Gráfico com os resultados da calibração efetuada em Marvão. ....	34
Figura 42 – Gráfico com a variação mensal da Radiação solar Global média diária para o mês de Agosto e comparação com os dados de Évora. ....	37
Figura 43 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Global média diária para o mês de Agosto e comparação com os dados de Évora. ....	38
Figura 44 – Gráfico com a média mensal da Radiação solar Global para Agosto e comparação com Évora. ....	39
Figura 45 – Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global para Agosto e comparação com Évora. ....	39
Figura 46 – Gráfico com a variação mensal da Radiação solar Global média diária para o mês de Setembro e comparação com os dados de Évora. ....	41
Figura 47 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Global média diária para o mês de Setembro e comparação com os dados de Évora. ....	42
Figura 48 – Gráfico com a média mensal da Radiação solar Global para Setembro e comparação com Évora. ....	43
Figura 49 – Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global para Setembro e comparação com Évora. ....	43
Figura 50 – Gráfico com a variação mensal da Radiação solar Global média diária para o mês de Outubro e comparação com os dados de Évora. ....	44
Figura 51 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Global média diária para o mês de Outubro e comparação com os dados de Évora. ....	45
Figura 52 – Gráfico com a média mensal da Radiação solar Global para Outubro e comparação com Évora. ....	46
Figura 53 – Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global para Outubro e comparação com Évora. ....	46
Figura 54 – Gráfico com a variação mensal da Radiação solar Global média diária para o mês de Novembro e comparação com os dados de Évora. ....	48
Figura 55 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Global média diária para o mês de Novembro e comparação com os dados de Évora. ....	49
Figura 56 – Gráfico com a média mensal da Radiação solar Global para Novembro e comparação com Évora. ....	49
Figura 57 – Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global para Novembro e comparação com Évora. ....	50
Figura 58 – Gráfico com a variação mensal da Radiação solar Global média diária para o mês de Dezembro e comparação com os dados de Évora. ....	51

Figura 59 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Global média diária para o mês de Dezembro e comparação com os dados de Évora. ....	52
Figura 60 – Gráfico com a média mensal da Radiação solar Global para Dezembro e comparação com Évora. ....	53
Figura 61 – Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global para Dezembro e comparação com Évora. ....	53
Figura 62 – Gráfico com a média semestral da Radiação solar Global para o Alto Alentejo e Évora. ....	55
Figura 63 – Gráfico com a média semestral da Irradiação solar Global para o Alto Alentejo e Évora. ....	55
Figura 64 – Mapa com a média semestral da Radiação solar Global para o Alto Alentejo. ....	56
Figura 65 – Mapa com a média semestral da Irradiação solar Global para o Alto Alentejo. ....	57
Figura 66 – Gráfico com a variação da Irradiação solar média diária em Portalegre – 01/11/2013 a 09/01/2014 Dados utilizados para o estudo das correlações. ....	59
Figura 67 - Gráfico com a variação de $K_d$ em função $K_T$ – Dados de Portalegre após a filtragem; Correlação de 1º grau. ....	62
Figura 68 - Gráfico com a variação de $K_d$ em função $K_T$ – Dados de Portalegre após a filtragem; Correlação de 2º grau. ....	62
Figura 69 - Comparação entre os valores medidos e os valores calculados a partir das correlações da Irradiação solar Difusa média diária. ....	67
Figura 70 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Difusa média diária para o mês de Agosto. ....	68
Figura 71 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global e Difusa para Agosto. ....	69
Figura 72 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Difusa média diária para o mês de Setembro. ....	70
Figura 73 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global e Difusa para Setembro. ....	71
Figura 74 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Difusa média diária para o mês de Outubro. ....	72
Figura 75 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global e Difusa para Outubro. ....	72
Figura 76 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Difusa média diária para o mês de Novembro. ....	73
Figura 77 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global e Difusa para Novembro. ....	74
Figura 78 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Difusa média diária para o mês de Dezembro. ....	75
Figura 79 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global e Difusa para Dezembro. ....	75
Figura 80 – Gráfico com a média semestral da Irradiação solar Difusa e Global para o Alto Alentejo. ....	76
Figura 81 - Mapa com a média semestral da Irradiação solar Difusa para o Alto Alentejo. ....	77
Figura 82 - Variação horária da Radiação solar Global em Portalegre para o período de 11 a 14 de Novembro. ....	79

Figura 83 - Dia 11/Nov - comparação entre os valores horários de Radiação solar DNI medidos e calculados.....	79
Figura 84 - Dia 12/Nov - comparação entre os valores horários de Radiação solar DNI medidos e calculados.....	80
Figura 85 - Dia 13/Nov - comparação entre os valores horários de Radiação solar DNI medidos e calculados.....	80
Figura 86 - Dia 14/Nov - comparação entre os valores horários de Radiação solar DNI medidos e calculados.....	81
Figura 87 - Gráfico com a variação da Irradiação solar DNI média diária em função de $K_T$ – Dados de Portalegre após a filtragem; Correlação de 1º grau.....	83
Figura 88 - Gráfico com a variação da Irradiação solar DNI média diária em função de $K_T$ – Dados de Portalegre após a filtragem; Correlação de 2º grau.....	84
Figura 89 - Comparação entre os valores medidos e os valores calculados a partir das correlações da Irradiação solar DNI média diária.....	86
Figura 90 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar DNI média diária para o mês de Agosto. ....	88
Figura 91 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar DNI para Agosto. ....	89
Figura 92 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar DNI média diária para o mês de Setembro.....	90
Figura 93 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar DNI para Setembro.....	90
Figura 94 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar DNI média diária para o mês de Outubro.....	91
Figura 95 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar DNI para Outubro. ....	92
Figura 96 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar DNI média diária para o mês de Novembro.....	93
Figura 97 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar DNI para Novembro.....	93
Figura 98 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar DNI média diária para o mês de Novembro.....	94
Figura 99 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar DNI para Dezembro.....	95
Figura 100 – Gráfico com a média semestral da Irradiação solar DNI para o Alto Alentejo. ....	96
Figura 101 - Mapa com a média semestral da Irradiação solar DNI para o Alto Alentejo.....	97

## Nomenclatura

AST	Hora solar aparente	horas
$A_{\text{superfície terrestre}}$	Área da superfície terrestre	$\text{m}^2$
$C_a$	Média dos valores de $K_d$ ou $K_{dd}$ calculados a partir da correlação	-
$C_i$	Valor de $K_d$ ou $K_{dd}$ calculado a partir da correlação	-
coeficiente <sub>estação</sub>	Média do quociente entre $I_{h\text{-CMP11}}$ e $I_{h\text{-estação}}$ a cada instante	-
Diferença <sub>estação</sub>	Diferença em percentagem entre os valores medidos pelo piranómetro de cada estação e o piranómetro da UE	%
E	Erro relativo em percentagem	%
$E_{\text{solar anual}}$	Energia total proveniente do sol durante um ano	EJ
ET	Equação do tempo	minutos
$\overline{H_d}$	Irradiação solar Difusa média diária	$\text{MJ}/\text{m}^2$
$\overline{H_d\text{-mensal}}$	Média mensal da Irradiação solar Difusa	$\text{MJ}/\text{m}^2$
$\overline{H_{DNI}}$	Irradiação solar DNI média diária	$\text{MJ}/\text{m}^2$
$\overline{H_{DNI\text{-mensal}}}$	Média mensal da Irradiação solar DNI	$\text{MJ}/\text{m}^2$
$\overline{H_{DNI\text{-semestral}}}$	Média semestral da Irradiação solar DNI	$\text{MJ}/\text{m}^2$
$\overline{H_d\text{-semestral}}$	Média semestral da Irradiação solar Difusa	$\text{MJ}/\text{m}^2$
$\overline{H_h}$	Irradiação solar Global média diária	$\text{MJ}/\text{m}^2$
$\overline{H_h\text{-mensal}}$	Média mensal da Irradiação solar Global	$\text{MJ}/\text{m}^2$
$\overline{H_h\text{-semestral}}$	Média semestral da Irradiação solar Global	$\text{MJ}/\text{m}^2$

$H_o$	Irradiação solar extraterrestre diária	MJ/m <sup>2</sup>
$I_b$	Radiação solar Direta	W/m <sup>2</sup>
$I_d$	Radiação solar Difusa	W/m <sup>2</sup>
$\bar{I}_d$	Radiação solar Difusa média diária	W/m <sup>2</sup>
$I_{DNI}$	Radiação solar DNI	W/m <sup>2</sup>
$I_h$	Radiação solar Global	W/m <sup>2</sup>
$\bar{I}_h$	Radiação solar Global média diária	W/m <sup>2</sup>
$I_{h-Base}$	Radiação solar Global convertida através do produto entre o coeficiente de cada estação (coeficiente <sub>estação</sub> ) e a $I_{h-estação}$	W/m <sup>2</sup>
$I_{h-CMP11}$	Radiação solar Global medida a cada intervalo de tempo pelo piranómetro da UE	W/m <sup>2</sup>
$I_{h-estação}$	Radiação solar Global medida a cada intervalo de tempo pelo piranómetro da respetiva estação	W/m <sup>2</sup>
$\bar{I}_{h-mensal}$	Média mensal da Radiação solar Global	W/m <sup>2</sup>
$I_o$	Contante solar	W/m <sup>2</sup>
$K_d$	Fração da Radiação solar Difusa	-
$K_{dd}$	Coeficiente de Radiação Difusa	-
$K_T$	Valor diário do índice de transparência do céu - " <i>clearness index</i> "	-
LL	Longitude local	º
LST	Hora local <i>standard</i>	horas
$m_a$	Média dos valores de $K_d$ ou $K_{dd}$ calculados a partir dos valores medidos	-
MAPE	Valor absoluto do erro médio em percentagem	-

MBE	Tendência do erro médio	-
$m_i$	Valor de $K_d$ ou $K_{dd}$ calculado a partir das medições	-
MPE	Erro médio em percentagem	-
$n$	Dia do ano	dias
$N_{amostra}$	Número total de valores medidos em cada estação durante o processo de calibração	-
$n_{amostra}$	Número total de valores da amostra	-
$n_{dia}$	Número de dias de cada mês	dias
$n_{mês}$	Número de meses referentes à análise	-
$N_{sol}$	Número total de valores registados ao longo de cada dia solar	-
$R^2$	Coeficiente de determinação	-
RMSE	Raiz quadrada do erro médio	-
RSE	Erro padrão relativo	-
S	Valor medido de horas de sol num dia	horas
SL	Longitude <i>standard</i>	°
$S_o$	Duração do dia solar	horas
SSRE	Soma do quadrado do erro relativo	-
$T_{ano}$	Duração de um ano em segundos	s
$T_{dia}$	Duração do dia em segundos	s
w	Ângulo solar horário	°

$w_s$	Ângulo de nascer e pôr-do-sol	°
$w_{s-}$	Hora de nascer do sol	horas
$w_{s+}$	Hora de pôr-do-sol	horas
$z$	Ângulo solar zenital	°

### Letras Gregas

$\alpha$	Ângulo solar azimutal	°
$\beta$	Ângulo de inclinação de uma determinada superfície em relação ao plano horizontal	°
$\delta$	Declinação solar	°
$\theta$	Ângulo de incidência	°
$\lambda$	Latitude local	°
$\Upsilon$	Ângulo da altitude solar	°

## Lista de abreviaturas

AREANATEjo	Agência Regional de Energia e Ambiente do Norte Alentejano
Cátedra BES-ER	Cátedra BES - Energias Renováveis
CGE	Centro de Geofísica da Universidade de Évora
CIMAA	Comunidade Intermunicipal do Alto Alentejo
DNI	Radiação solar Direta normal incidente
ENERCOUTIM	Associação Empresarial de Energia solar de Alcoutim
ESTG-IPP	Escola Superior de Tecnologia e Gestão – Instituto Politécnico de Portalegre
GPS	Sistema de posicionamento global
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
IPES	Instituto Português de Energia solar
LÓGICA EM SA	Sociedade Gestora do Parque Tecnológico de Moura, EM SA
OMM	Organização Meteorológica Mundial
UE	Universidade de Évora

# **1 Introdução**

## **1.1 Objetivos**

O objetivo central da presente Dissertação de Mestrado consiste na análise das várias componentes da Radiação solar no Alentejo, tendo em vista o início do estudo da Radiação solar DNI.

Para atingir esse objetivo, inicialmente é efetuado o estudo teórico dos ângulos solares e definição da Radiação solar fora da atmosfera terrestre e dentro da atmosfera terrestre. De seguida é efetuada uma abordagem aos sensores de Radiação solar que permitem a sua quantificação, ao nível do seu funcionamento e montagem.

De seguida é apresentado o projeto RETALER II que tem vindo a ser desenvolvido no IPES, o qual corresponde à análise e mapeamento solar do Alto Alentejo, para o qual foram instaladas oito estações meteorológicas durante o ano de 2013.

Utilizando os dados do referido projeto é efetuada a análise das várias componentes da Radiação solar, bem como o estudo das correlações que permitem estimar as várias componentes da Radiação solar, dando-se início ao desenvolvimento de novas correlações e ao estudo da Radiação solar DNI.

Por fim são apresentados os objetivos da candidatura ao projeto DNI, em que participei, que irá permitir efetuar o estudo e análise da Radiação solar DNI a nível nacional com o objetivo de desenvolver correlações para estimar a componente DNI e definir locais de excelência para a instalação de centrais solares de alta concentração.

## **1.2 Energia, qual o futuro?**

Energia é a palavra-chave nos dias que decorrem muito devido ao contínuo aumento do consumo de energia a nível Mundial (Figura 1) que se tem registado durante os últimos anos e que se perspectiva que continue a aumentar. O consumo exorbitante de energia acompanha o também contínuo crescimento da população Mundial (Figura 2), o que tem provocado um largo aumento sobretudo ao nível do consumo dos combustíveis fósseis, conduzindo à diminuição da sua disponibilidade e ao conseqüente aumento dos gases com efeito de estufa.

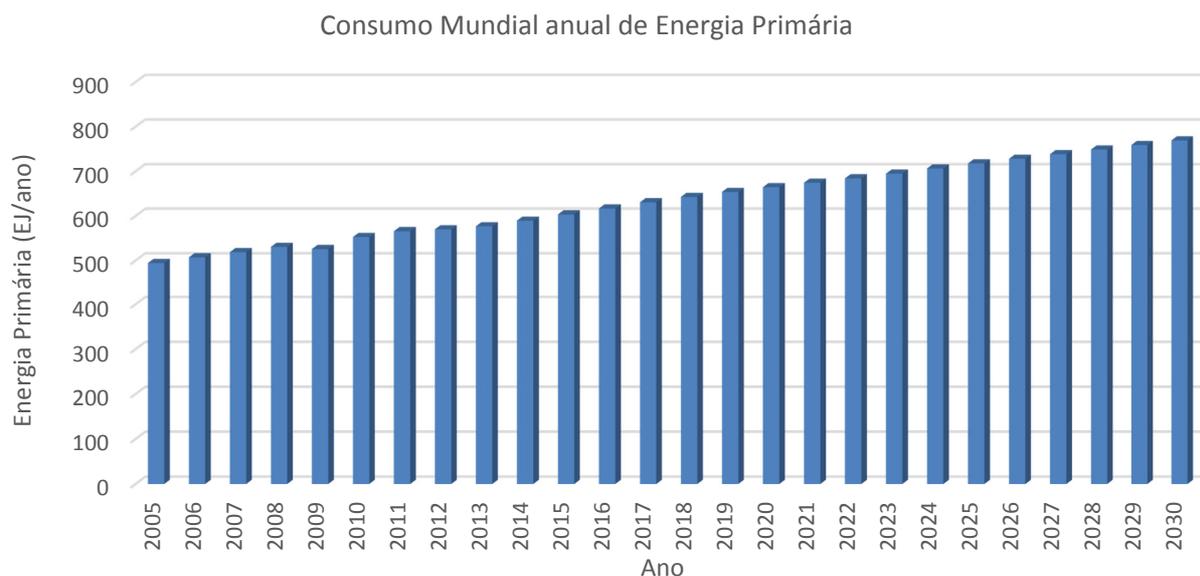


Figura 1 - Consumo Mundial anual de Energia Primária, 2005 – 2030. Adaptado de [1].

Este aumento global de consumo de energia requer soluções, nomeadamente uma capacidade enorme para desenvolver novas tecnologias de captação, armazenamento e conversão de energia.

Associado a todos os fatores supracitados e como resposta a esses problemas a eficiência energética e as energias denominadas renováveis têm vindo a adquirir um papel preponderante e fulcral em todo o mundo, tornando-se as palavras de ordem nos dias que decorrem, surgindo como uma solução viável para o problema em questão.

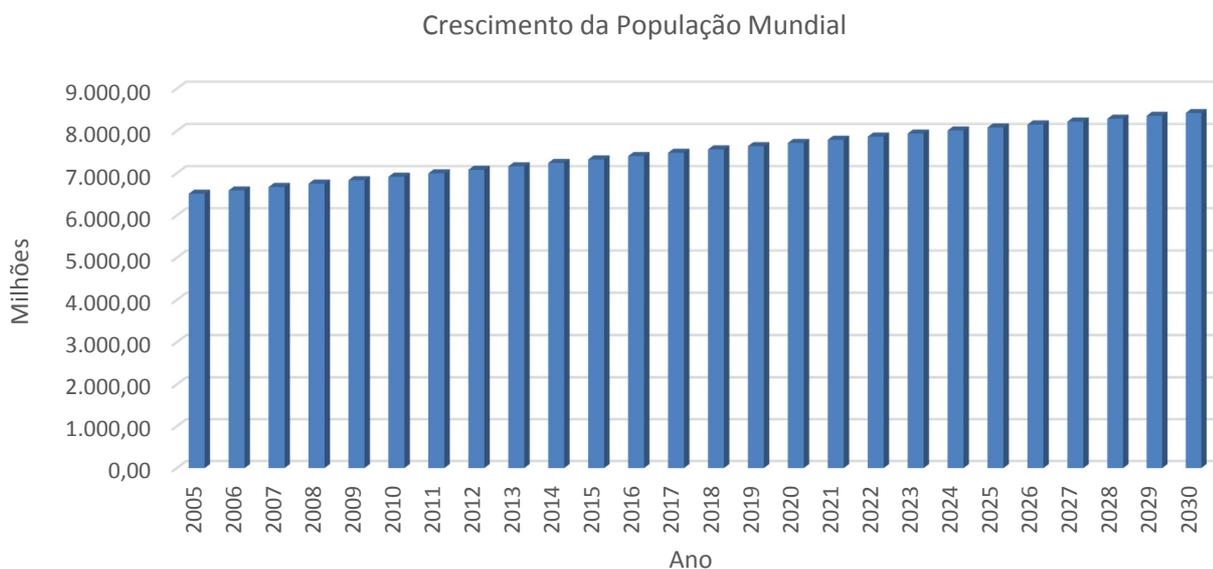


Figura 2 - Crescimento da População Mundial, 2005 – 2030. Adaptado de [2].

O sol é o responsável número um por toda a energia que temos disponível, pois o sol é a maior fonte de energia renovável e com maior abundância em todo o planeta, podendo ser encarada, em conjunto com outras fontes de energia, como uma alternativa viável aos combustíveis fósseis.

Tendo em conta que a constante solar ( $I_0$ ), ou seja a Radiação solar extraterrestre toma um valor médio de  $1367 \text{ W/m}^2$  então a energia total proveniente do sol que atinge a Terra por ano é dada por [3]:

$$E_{\text{solar anual}} = I_0 \times A_{\text{superfície terrestre}} \times T_{\text{ano}} \cong 5\,490\,000 \text{ EJ} \quad 1.1A$$

Em que:  $A_{\text{superfície terrestre}} = \pi \times (6365 \times 10^3)^2 \text{ [m}^2\text{]}$  1.1B

$$T_{\text{ano}} = 86400 \times 365,25 \text{ [s]} \quad 1.1C$$

Contudo nem toda a energia que provem do sol pode ser aproveitada, uma vez que a Radiação solar ao entrar na atmosfera terrestre sofre diversos fenómenos, nomeadamente dispersão simples e múltipla, reflexão e absorção através das nuvens e partículas suspensas no ar que representa cerca de 49% de toda a Radiação solar (Figura 3). Por outro lado a Radiação solar também não pode ser aproveitada em toda a superfície terrestre, uma vez que a água representa cerca de três quartos (3/4) da superfície total da Terra.

Ainda assim se apenas se considerar que só 10% da Radiação solar incidente pode ser aproveitada, e tendo em conta que em 2013 o consumo Mundial de Energia foi de 576,9 EJ (Figura 1), então de acordo com a equação 1.1 A apenas 0,1% dos 10% utilizáveis será suficiente para fornecer energia para todo o planeta durante um ano [3].

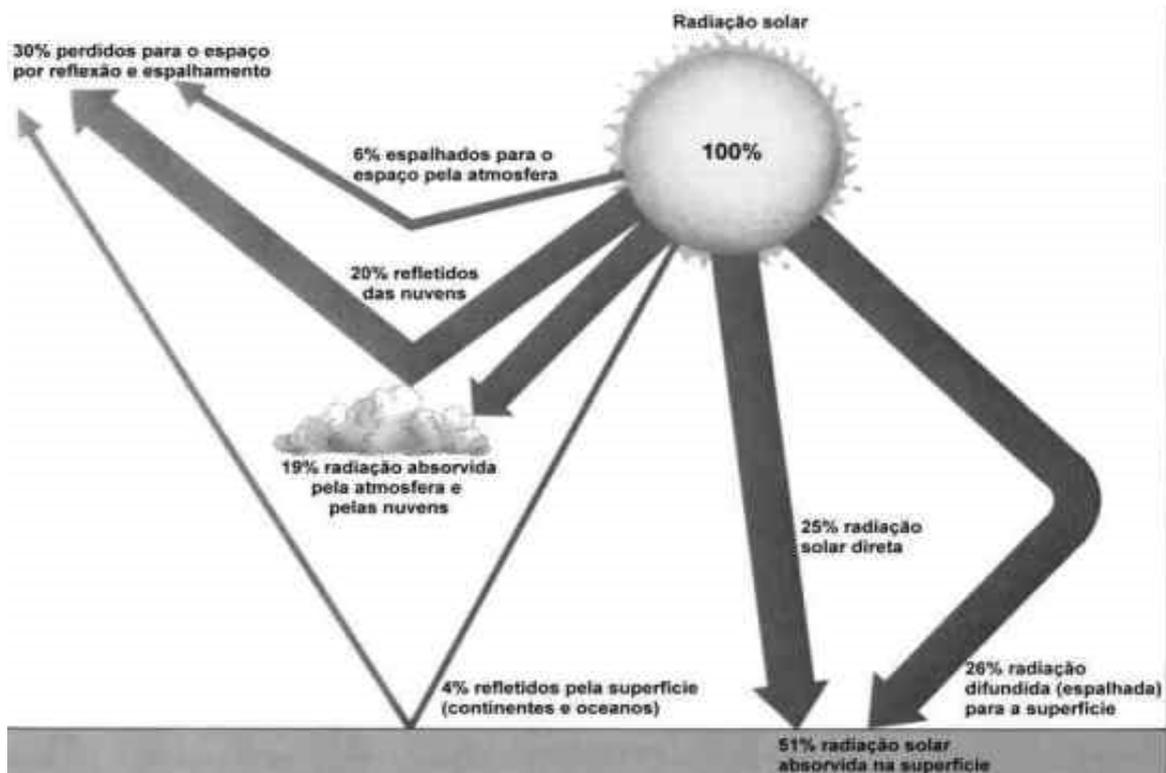


Figura 3 - Distribuição percentual da Radiação solar incidente [4].

A Energia solar emerge como uma das fontes de Energia potencialmente mais importantes no futuro. Um futuro onde os combustíveis fósseis serão cada vez mais caros, porque serão progressivamente mais escassos, e porque os seus múltiplos impactes sobre o ambiente, se tornarão cada vez mais significativos, como é o caso do efeito de estufa e das alterações climáticas. A Energia solar, por um lado, renovável (inesgotável) e, por outro, limpa é uma alternativa abundante e disponível em todo o território do nosso país, constituindo o recurso energético mais importante, em contraste com a situação dos recursos fósseis que hoje importamos.

A utilização da Energia solar já assume alguma expressão em Portugal, através de aplicações térmicas, como por exemplo o aquecimento de águas sanitárias, e conversão em eletricidade através da tecnologia fotovoltaica. Contudo há muitas mais aplicações possíveis, incluindo o aquecimento e arrefecimento de ambientes, o calor de processo na indústria, a dessalinização da água salobra para produção de água potável, a produção de eletricidade por via térmica (centrais de concentração solar), com tecnologias que hoje começam a estar suficientemente desenvolvidas e mais perto do mercado.

Outras aplicações ainda em fase de investigação permitirão até produzir novos combustíveis (*solar fuels*) a partir de matérias-primas como a biomassa, o ar, o CO<sub>2</sub> e a água, o processamento de materiais, etc., que poderão vir a desempenhar um papel muito interessante e fundamental no futuro.

Em suma, para que se possa tirar o máximo proveito e rentabilidade deste recurso energético é necessário quantificá-lo, tornando-se fundamental o seu estudo e caracterização para que a informação resultante possa ser utilizada no dimensionamento de projetos de produção de energia. Por outro lado os resultados de um estudo desta natureza servem de garantia para as entidades financiadoras e como prova para fomentar o investimento das empresas em tecnologias que utilizam a Energia proveniente do sol.

## 2 Ângulos, Radiação e sensores solares

### 2.1 Ângulos solares

Para além das condições meteorológicas, outro fator que determina a quantidade de Radiação solar incidente numa determinada superfície é o movimento aparente do sol ao longo do dia. A órbita da Terra em torno do sol (Figura 4) apresenta uma trajetória elíptica com uma excentricidade de 3%. O eixo de rotação da Terra, ao longo do ano, forma sempre o mesmo ângulo de  $23,45^\circ$  entre a perpendicular e o plano elíptico [5].

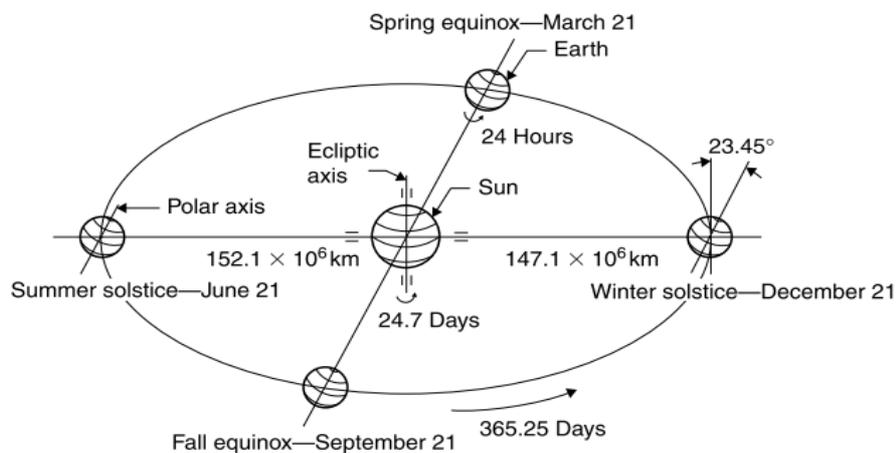
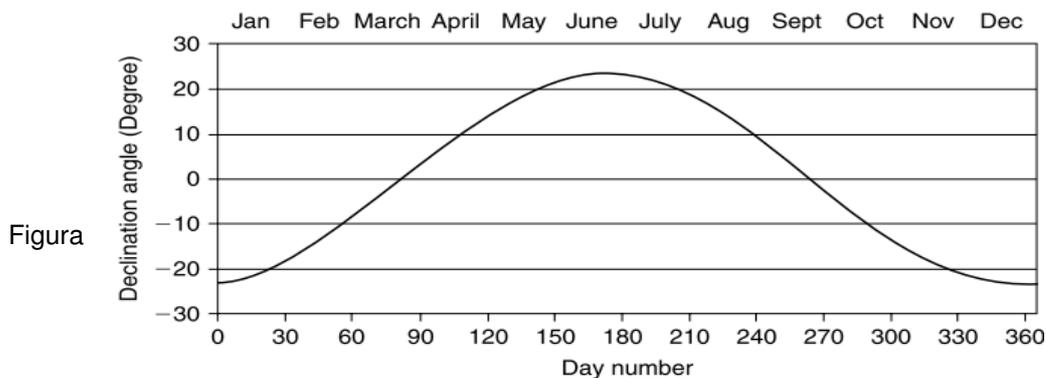


Figura 4 - Movimento anual da Terra relativamente ao sol [6].

#### 2.1.1 Declinação solar ( $\delta$ )

O ângulo formado entre a posição do sol e o plano equatorial terrestre denomina-se por Declinação solar ( $\delta$ ). A Declinação solar (Figura 5) varia entre  $-23,45^\circ$  no solstício de Inverno e  $23,45^\circ$  no solstício de Verão.



Figura

5 -

Variação da Declinação solar ao longo do ano [6].

O valor da Declinação solar para cada dia do ano pode ser obtido a partir da seguinte equação [7]:

$$\delta = \arcsin \left( 0,3979 \times \sin \left( \frac{2\pi(n + 284)}{365,25} \right) \right) \quad 2.1$$

Em que n = dia do ano a contar a partir de dia 1 de Janeiro.

### 2.1.2 Equação do tempo (ET)

Devido a fatores associados à órbita da Terra em torno do sol a hora solar aparente (AST) ao longo do ano apresenta ligeiras variações, ou seja o período de rotação da Terra varia ao longo do ano, sendo essas variações expressas pela equação do tempo (ET) (Figura 6). A equação do tempo pode ser descrita em função de n – dia do ano pela seguinte equação [6]:

$$ET = 9,87 \times \sin(2B) - 7,53 \times \cos(B) - 1,5 \times \sin(B) \text{ [min]} \quad 2.2$$

Em que:

$$B = (n - 81) \times \frac{360}{364} \quad 2.3$$

A equação geral para calcular a hora solar aparente (AST) é dada por [6]:

$$AST = LST + ET \pm 4(SL - LL) \text{ [horas]} \quad 2.4$$

Em que LST= Hora local *standard*;

ET= Equação do tempo;

SL= Longitude *standard*;

LL= Longitude local

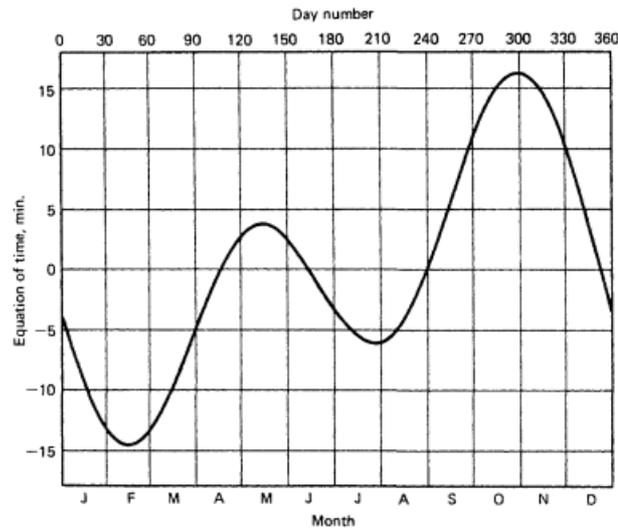


Figura 6 - Variação da ET, em minutos, ao longo do ano [8].

### 2.1.3 Ângulo horário (w)

Na Figura 7 é possível observar o ângulo horário (w) do ponto P que é medido no plano equatorial da Terra entre a projeção OP e a projeção do centro Terra-sol para a linha central [6].

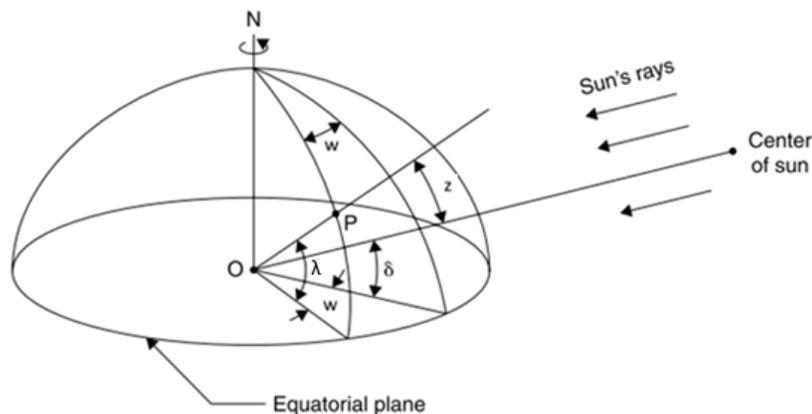


Figura 7 - Representação do ângulo horário (w), Declinação solar (δ) e latitude (λ). Adaptado de [6].

O ângulo horário ao meio dia solar é zero, tomando o valor positivo nas horas da tarde e o valor negativo nas horas da manhã. Em termos de equivalência 1 (uma) hora corresponde a 15°. Por exemplo às 15 horas solares corresponde um ângulo horário de 30°. O ângulo horário (w) pode ser obtido a partir da seguinte equação [6]:

$$w = (AST - 12) \times 15 [^\circ]$$

2.5

#### 2.1.4 Ângulo solar Zenital (z) e ângulo da altitude solar (γ)

O ângulo solar Zenital (z) é o ângulo formado entre os raios solares e o plano vertical da superfície terrestre (Figura 8). Por outro lado o ângulo da altitude solar (γ) é o ângulo complementar do ângulo solar Zenital, ou seja, é o ângulo formado entre os raios solares e o plano horizontal da superfície terrestre (Figura 8).

A expressão que permite obter ambos os ângulos é dada por [6]:

$$\sin(\gamma) = \cos(z) = \sin(\lambda) \times \sin(\delta) + \cos(\lambda) \times \cos(\delta) \times \cos(w) \quad 2.6$$

#### 2.1.5 Ângulo solar Azimutal (α)

O ângulo solar Azimutal (α) é o ângulo medido a partir da projeção dos raios solares no plano horizontal em relação ao Sul para o Hemisfério Norte (Figura 8). O sentido de Sul para Oeste é designado como positivo.

A expressão matemática para o ângulo solar Azimutal é dada por [6]:

$$\sin(\alpha) = \frac{\cos(\delta) \times \sin(w)}{\cos(\gamma)} \quad 2.7$$

De acordo com [9] a equação 2.7 só é válida se verificar a condição  $\cos(w) > \tan(\delta) / \tan(\lambda)$ . Caso a condição não se verifique terá de ser efetuada a correção do ângulo solar Azimutal, ou seja, o ângulo solar azimutal para as horas da manhã será dado por  $-\pi + |\alpha|$ , e para as horas da tarde por  $\pi - \alpha$ .



### 2.1.7 Ângulo de incidência ( $\theta$ )

O ângulo de incidência ( $\theta$ ) é o ângulo formado entre os raios solares e a componente normal de uma determinada superfície. Para uma superfície cuja inclinação ( $\beta$ ) em relação ao plano horizontal é  $\beta=0^\circ$ , o ângulo de incidência corresponde ao ângulo solar zenital.

A expressão geral para determinar o ângulo de incidência para uma determinada superfície a cada instante é dada por [10]:

$$\begin{aligned}\cos(\theta) = & \sin(\lambda) \sin(\delta) \cos(\beta) \\ & - \cos(\lambda) \sin(\delta) \sin(\beta) \cos(\alpha) \\ & + \cos(\lambda) \cos(\delta) \cos(w) \cos(\beta) \\ & + \sin(\lambda) \cos(\delta) \cos(w) \sin(\beta) \cos(\alpha) \\ & + \cos(\delta) \sin(w) \sin(\beta) \sin(\alpha)\end{aligned}\tag{2.10}$$

Os equipamentos utilizados para medir a Radiação solar e os sistemas de captação de Radiação solar para produção de Energia podem utilizar sistemas de seguimento solar (*Tracking*), dependendo da tecnologia a aplicar e a finalidade pretendida.

Nos sistemas de seguimento do sol a dois eixos o sistema mantém sempre a superfície em questão orientada para sol, sendo o valor do ângulo de incidência, em qualquer instante,  $\theta=0^\circ$ . Estes mecanismos apresentam a vantagem de permitir a máxima captação de Radiação solar, dependendo o seu desempenho da precisão do equipamento de seguimento em questão.

## 2.2 Radiação solar

A Radiação solar fora da atmosfera é descrita num plano normal à direção Terra-sol por constante solar ( $I_o$ ), cujo valor médio é  $1367 \text{ W/m}^2$ , sendo a variação da distância Terra-sol responsável pela sua flutuação em torno do valor médio [11]. A Radiação solar é composta por duas componentes, ou seja, a componente Direta e Difusa, sendo que a Radiação solar Global em cada instante ( $I_h$ ) é a soma da componente Direta com a componente Difusa (esta equação apenas é válida para o plano horizontal) [7]:

$$I_h = I_b + I_d \text{ [W/m}^2\text{]} \quad 2.11$$

A Radiação solar Direta ( $I_b$ ) é a componente que provem diretamente do disco solar, enquanto a Radiação solar Difusa ( $I_d$ ) é a restante Radiação que chega a uma determinada superfície proveniente de todas as outras direções devido a fenômenos de reflexão e espalhamento. No contexto deste trabalho adota-se a definição de Radiação solar Direta Normal ( $I_{DNI}$ ) como a Radiação solar Direta num plano perpendicular à direção Terra-Sol, relacionando-se com a Radiação solar Direta através da seguinte expressão [6]:

$$I_b = I_{DNI} \times \cos(\theta) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad 2.12$$

### 2.2.1 Irradiação solar extraterrestre ( $H_o$ )

Através dos ângulos solares definidos anteriormente é possível obter o valor diário da Irradiação solar total disponível, no plano horizontal, fora da atmosfera terrestre, ou seja a Irradiação solar extraterrestre ( $H_o$ ) que é dada pela seguinte equação [7]:

$$H_o = \frac{T_{\text{dia}}}{\pi \times 10^6} \times I_o \left[ 1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{2\pi \times n}{365,25}\right) \right] \cos(\lambda) \cos(\delta) [\sin(w_s) - w_s \cos(w_s)] \text{ [MJ/m}^2\text{]} \quad 2.13$$

$$\text{Em que: } T_{\text{dia}} = 24 \times 3600 \text{ [s]} \quad 2.14$$

### 2.2.2 Irradiação solar Terrestre

A Radiação solar ao entrar na atmosfera terrestre sofre diversos fenômenos até atingir a superfície terrestre, nomeadamente reflexão, dispersão e absorção devido à presença de nuvens, partículas e gases suspensos no ar. Estes fenômenos podem ser contabilizados através do conceito de índice de transparência ( $K_T$ ) ou “*clearness index*” que traduz de uma forma simplificada a transparência da atmosfera à Radiação solar incidente no topo da atmosfera, ou seja, é a fração da Radiação solar extraterrestre que chega à superfície da Terra. O valor diário de  $K_T$  é definido como sendo [7]:

$$K_T = \frac{\overline{H_h}}{H_o} \quad 2.15$$

Em que  $\overline{H_h}$  é o valor médio diário da Irradiação solar Global expresso em MJ/m<sup>2</sup>, que pode ser obtido através da seguinte equação:

$$\overline{H_h} = \overline{I_h} \times S_o \times \frac{3,6}{1000} \quad [\text{MJ}/\text{m}^2] \quad 2.16$$

Em que  $\overline{I_h}$  é a Radiação solar Global média diária expressa em W/m<sup>2</sup>, que pode ser obtida a partir da seguinte equação:

$$\overline{I_h} = \frac{\sum_{w_{s-}}^{w_{s+}} I_h}{N_{sol}} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad 2.17$$

Em que  $w_{s-}$  e  $w_{s+}$  correspondem ao nascer e por-do-sol, respetivamente. Por outro lado  $N_{sol}$  representa o número total de valores registados ao longo do dia solar.

## **2.3 Sensores de Radiação solar**

A caracterização da Radiação solar é bastante importante e necessária para aplicação em projetos de dimensionamento, avaliação do desempenho de sistemas solares, pesquisa de novas aplicações de Energia solar e até mesmo para promover uma determinada região.

Para caracterizar a Radiação solar é necessário um determinado número de parâmetros, nomeadamente quantificar a Radiação solar Global, Difusa, Direta e a duração do dia solar. De forma a quantificar os parâmetros referidos são utilizados diversos sensores solares que serão descritos de seguida.

### **2.3.1 Piranómetro**

O piranómetro (Figura 9) é o sensor de Radiação solar mais comum e tem como função medir a Radiação solar Global. As medições da Radiação solar Global são normalmente definidas como sendo a Radiação solar Global no Plano Horizontal.

Existem diversos tipos de piranómetros, sendo que a sua classificação é efetuada de acordo com a sua precisão de leitura e tempo de resposta às variações da Radiação solar. Sendo assim os piranómetros podem-se classificar da seguinte forma do mais preciso para o menos preciso [12]:

- I. Padrão Primário;
- II. Padrão Secundário;
- III. Primeira Classe;
- IV. Segunda Classe.



Figura 9 - Piranómetro CMP3 da Kipp & Zonen – Segunda Classe [13].

A componente Difusa da Radiação solar também pode ser medida através de um piranómetro, sendo que para esse efeito é necessário um equipamento adicional que é um disco ou anel de sombreamento (Figura 10), que desempenha a função de bloquear a componente Direta da Radiação solar que provem diretamente do disco solar.

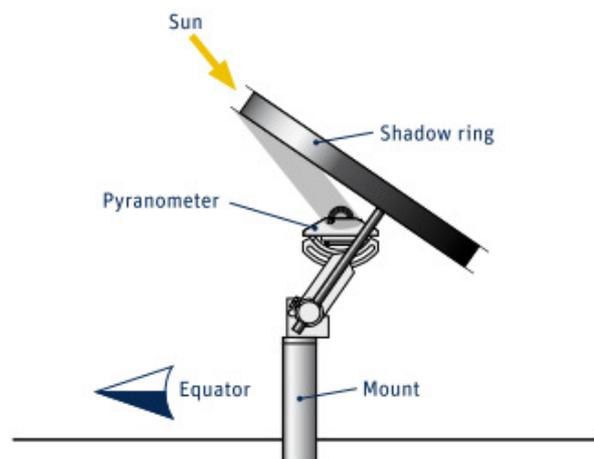


Figura 10 - Anel de sombreamento estático – ajuste sazonal [14]

O sistema de sombreamento mencionado requer ajustes sazonais para seguir o movimento 'aparente' do sol, sendo posteriormente necessário efetuar uma correção de Banda à leitura devido aos ajustes sazonais. Em alternativa pode ser utilizado um sistema autónomo preciso de seguimento do sol a dois eixos como o do exemplo da Figura 11 que segue o sol através de um sistema de GPS, em que as bolas pretas bloqueiam a Radiação solar Direta.



Figura 11 - Sistema autónomo de seguimento do sol a dois eixos – *Sun Tracker Solys 2* (Kipp & Zonen) [15].

Um piranómetro tem um funcionamento semelhante a uma termopilha, ou seja, consiste em dois circuitos elétricos compostos por dois materiais diferentes, sendo um denominado por 'circuito quente' e o outro por 'circuito frio'. O 'circuito quente' é pintado de preto fosco e situa-se na parte central do piranómetro exposto à Radiação solar. Por outro lado o 'circuito frio' está à sombra da Radiação solar e adquire uma temperatura semelhante à temperatura ambiente.

Quando a Radiação solar incide sobre o piranómetro provoca o aumento da temperatura do 'circuito quente', ou seja, passa a ter uma temperatura superior à do 'circuito frio'. A diferença de temperatura resultante entre os dois circuitos gera uma diferença de potencial que é proporcional à intensidade da Radiação solar, definindo-se a respetiva constante de calibração característica de cada piranómetro.

Para além da termopilha o piranómetro é constituído (Figura 12) por uma cúpula de vidro ou de quartzo que é transparente à Radiação num comprimento de onda compreendido entre os 280-2800 nm, sendo opaca à Radiação infravermelha. Alguns piranómetros são constituídos por duas cúpulas de vidro para reduzir o aquecimento e reduzir os erros de leitura. A cúpula apresenta também a função de proteger a termopilha contra o vento, chuva e poeiras, devendo ser limpa com um pano seco com uma periodicidade de 10 a 15 dias. Por fim o piranómetro dispõe ainda de dois 'pés' ajustáveis e uma bolha de nível para garantir que a Radiação solar que está a ser medida é no plano horizontal.

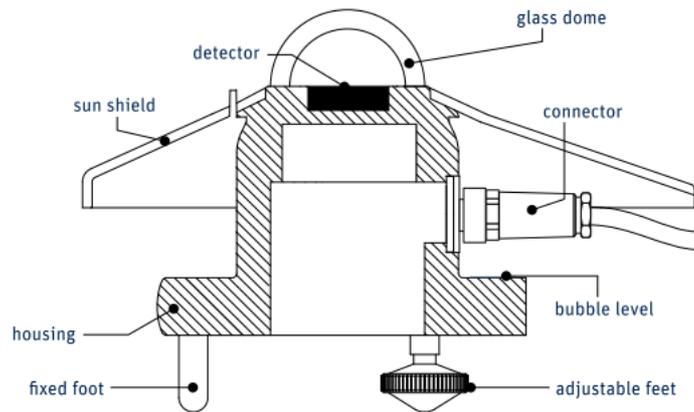


Figura 12 - Imagem em corte de um piranómetro e indicação dos seus constituintes [14].

### 2.3.2 Pireliómetro

O instrumento utilizado para medir a Radiação solar Direta Normal (DNI) é o pireliómetro (Figura 13) que apresenta uma pequena abertura de forma a visualizar apenas o disco solar e a região vizinha denominada circumsolar, ou seja tem um campo de visão de cerca de  $\pm 2,5$  graus que corresponde a cerca de 10 vezes o diâmetro aparente do disco solar, excluindo praticamente toda a Radiação dispersa do céu (componente Difusa).

O pireliómetro tem um sensor constituído por duas placas, situadas na base de um tubo enegrecido internamente, uma das quais é aquecida devido à incidência da Radiação solar DNI e a outra eletricamente. A intensidade de Radiação é proporcional à Energia gasta para igualar a temperatura da segunda placa à da primeira, logo a corrente consumida é proporcional à Radiação solar DNI definindo-se assim a constante de calibração para cada pireliómetro.



Figura 13 - Pireliómetro CHP1 (*Kipp & Zonen*) [16].

O pireliómetro é sensível a uma vasta gama de Radiação solar, normalmente entre os 200-4000 nm, e necessita de ser instalado num sistema auxiliar com seguimento do movimento 'aparente' do sol a dois eixos de forma a efetuar leituras da Radiação solar DNI. À semelhança do piranómetro, também o pireliómetro necessita que a sua lente seja limpa com um pano seco com uma periodicidade de 10 a 15 dias.

### 2.3.3 Sensor de Duração da luz solar

O valor medido da duração do dia solar (S) pode se obtido através de um equipamento específico denominado por 'sensor de duração da luz solar' (*sunshine duration sensor*) que de acordo com a OMM [17] mede o número de horas ao longo de um dia em que a Radiação solar Direta excede os 120 W/m<sup>2</sup>.

O equipamento mencionado (Figura 14) deverá ser instalado num mastro no plano vertical com uma inclinação igual à latitude  $\pm 1^\circ$  do local e orientado para o polo mais próximo entre  $\pm 5^\circ$  [18]. Por outro lado deverá ser instalado num local cujo horizonte esteja completamente desimpedido.

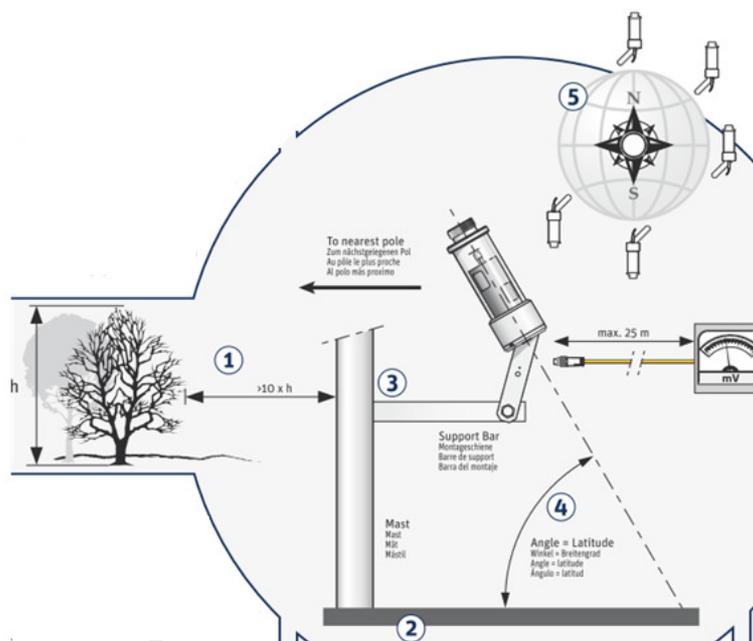


Figura 14 - Diagrama de montagem do 'sensor de duração da luz solar' [18].

### 2.3.3.1 Sensor de Campbell – Stokes

O sensor de Campbell – Stokes, ou Heliógrafo é o sensor mais comum e utilizado a nível mundial para efetuar a medição da duração do dia solar, tendo começado a ser desenvolvido por John Campbell em 1857, tendo sido posteriormente melhorado em 1870 por George Stokes.

Este sensor consiste numa lente esférica de vidro que está montada numa estrutura metálica de forma a concentrar os raios solares num cartão curvo montado de forma concêntrica com a esfera. Os raios solares ao incidirem no cartão ao longo do dia vão queimando o cartão. Devido ao movimento da Terra a posição do sol vai-se alterando ao longo do dia formando um rasto no cartão.



Figura 15 - Sensor de Campbell – Stokes [19].

Quando surge uma sombra devido, por exemplo, a uma nuvem o traço é interrompido. No final do dia, o comprimento total do traço, menos as lacunas provocadas pela sombra, é proporcional à duração do dia solar.

Os cartões utilizados são feitos a partir de um material especial que produz um traço bem visível mesmo quando a intensidade da Radiação solar é mais fraca. Diferentes cartões são utilizados para diferentes estações do ano, sendo que cada cartão é marcado com intervalos de uma hora, tendo a opção de utilizar um molde de plástico

transparente opcional marcada com escalas que permite medir com maior precisão a duração do dia solar.

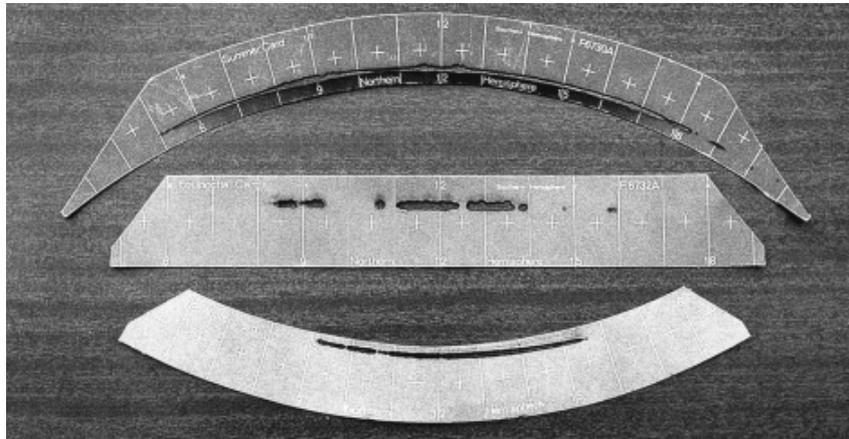


Figura 16 - Exemplo de cartões de registo da duração do dia solar [20].

A grande vantagem do sensor de Campbell - Stokes é a sua simplicidade e facilidade de utilização, uma vez que não existem partes móveis e, portanto, requer pouca manutenção. O sensor pode ser utilizado em qualquer lugar do mundo, com pouca ou nenhuma modificação em relação ao projeto inicial.

Em contrapartida quando o sol está baixo no céu, pode não ter intensidade suficiente para queimar corretamente o cartão. Isto ocorre diversas vezes ao nascer e pôr-do-sol. Por outro lado a chuva pode fazer com que o cartão seja rasgado ao removê-lo e, assim, tornar difícil a sua leitura.

No entanto, o maior problema é a leitura das cartas, ou seja à medida que o sol fica coberto e exposto a nuvens o registo pode ser interrompido por exemplo durante 30 segundos, como por 5 minutos ou mais. Assim, a leitura do cartão pode ser diferente de observador para observador.

### 3 Projeto RETALER II

Um dos pontos de trabalho da presente Dissertação de Mestrado é referente ao projeto RETALER II – ‘Mapeamento solar do Alto Alentejo’, que tenho vindo a desenvolver no IPES desde Junho de 2013. Como de seguida será explicado o projeto consiste na instalação de oito centrais meteorológicas para medição e análise da Radiação solar no Alto Alentejo.

#### 3.1 Descrição da Operação

##### 3.1.1 Localização da Operação

Para a concretização da presente operação foram instaladas sete estações meteorológicas periféricas em diferentes Municípios, e uma estação meteorológica central na cidade de Portalegre como se pode observar na Figura 17.

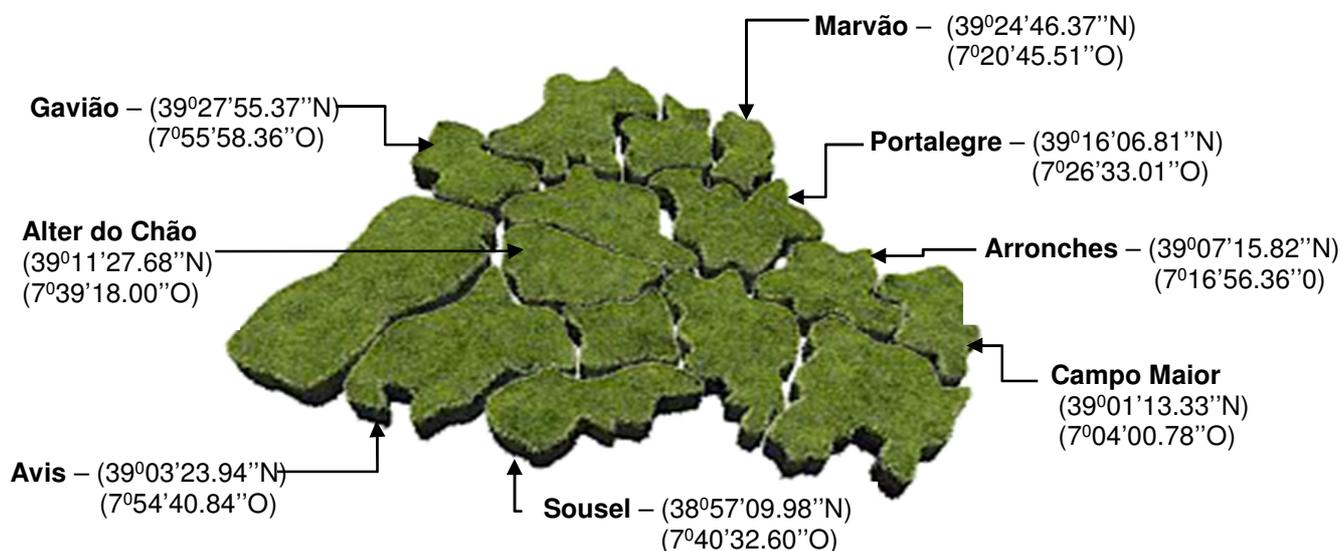


Figura 17 - Localização geográfica das estações meteorológicas.  
Sistema coordenado WGS 84 [19].

No Quadro 1 encontram-se as coordenadas e altitude relativa ao nível médio das águas do mar para cada uma das estações meteorológicas instaladas nos Municípios do Alto Alentejo.

Quadro 1 - Coordenadas das estações meteorológicas instaladas em cada Município.

	Alter do Chão	Arronches	Avis	Campo Maior	Gavião	Marvão	Portalegre	Sousel
<b>Latitude (° N)</b>	39,18	39,12	39,06	39,02	39,46	39,41	39,27	38,95
<b>Longitude (° O)</b>	7,65	7,28	7,91	7,07	7,93	7,35	7,44	7,68
<b>Altitude (m)</b>	274	277	140	300	284	506	345	275

### 3.1.2 Estações Meteorológicas

A estação meteorológica de Portalegre (Figura 18) encontra-se equipada com instrumentação que permite a leitura e aquisição de dados da Radiação solar Global (piranómetro CMP6), Difusa (piranómetro CMP6 + bolas de sombreamento) e DNI (pireliómetro CHP 1). De forma a ser efetuada corretamente a leitura da componente Difusa e DNI é utilizado o sistema de seguimento *Solys 2*.



Figura 18 - Estação meteorológica de Portalegre.

A estação meteorológica de Portalegre foi instalada no dia 12 de Junho por um técnico especializado que contou com a minha colaboração. O equipamento (*Solys 2*) foi instalado sobre uma base de betão e um suporte metálico previamente construídos.

Com o auxílio de uma bússola orientou-se a base do *Solys 2* para a direção Este (Figura 19). De seguida montou-se a restante estrutura do *Solys 2*, incluindo a bola de sombreamento, e através de uma bolha de nível de alta precisão que vem incorporada no equipamento nivelou-se recorrendo ao ajuste dos seus 'pés'.



Figura 19 - Orientação Este da Base do *Solys 2*.

O próximo passo foi a instalação dos dois piranómetros e nivelamento dos mesmos recorrendo a bolhas de nível incorporadas. Relativamente ao pireliómetro foi instalado na lateral do *Solys 2* e após a entrada em funcionamento do sistema foi verificado o seu ajuste de forma a ficar alinhado com o centro da imagem solar como se pode verificar na Figura 20.

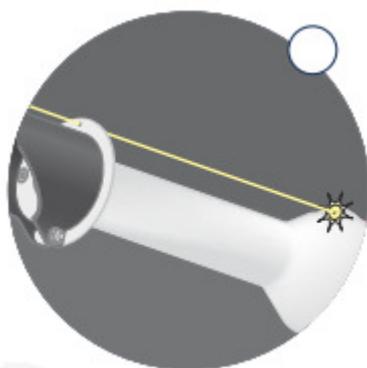


Figura 20 - Alinhamento do pireliómetro com o centro da imagem solar.

Por fim procedeu-se à instalação do sistema de aquisição de dados *Data Taker 82* (Figura 20) e respetiva configuração. O *Solys 2*, bem como os restantes equipamentos para funcionarem necessitam de ser alimentados por Energia elétrica, sendo que o equipamento regula-se sozinho através de um sistema GPS.



Figura 21 - Sistema de aquisição de dados da estação meteorológica de Portalegre.

No que se refere às sete estações meteorológicas periféricas a instrumentação instalada só permite a leitura (piranómetro CMP3) e aquisição de dados (*Meteon*) da Radiação solar Global. As referidas estações foram instaladas pelos técnicos responsáveis de cada Município, sendo que posteriormente algumas tiveram de ser reinstaladas devido à incorreta localização. De seguida ilustram-se as fotografias correspondentes à localização inicial de cada uma das estações meteorológicas periféricas instaladas.



Figura 22 - Estação meteorológica de Alter do Chão.



Figura 23 - Estação meteorológica de Arronches.



Figura 24 - Estação meteorológica de Avis.



Figura 25 - Estação meteorológica de Campo Maior.



Figura 26 - Estação meteorológica de Gavião.



Figura 27 - Estação meteorológica de Marvão.



Figura 28 - Estação meteorológica de Sousel.



Figura 29 - *Meteoron* – Sistemas de aquisição de dados das estações periféricas

Cada uma das estações meteorológicas instaladas permite obter dados com intervalos de 10 minutos, fornecendo informação acerca do valor mínimo, máximo e média a cada intervalo de 10 minutos, permitindo obter uma boa fiabilidade nos resultados obtidos e analisados.

No Quadro 2 é apresentada a lista de equipamentos instalados em cada uma das estações meteorológicas e a indicação da componente da Radiação solar sobre a qual permite obter dados, bem como a data de instalação.

Quadro 2 - Lista de equipamentos instalados.

Localidade	Edifício	Equipamento		Grandeza a medir	Data de instalação
		Designação	Modelo		
Alter do Chão	Pólo da U. Évora	Piranómetro	CMP 3	Radiação Global	01/07/2013
		<i>Data Logger</i>	<i>Meteon</i>	-	
Arronches	Centro Cultural	Piranómetro	CMP 3	Radiação Global	22/07/2013
		<i>Data Logger</i>	<i>Meteon</i>	-	
Avis	Parque de Campismo	Piranómetro	CMP 3	Radiação Global	09/07/2013
		<i>Data Logger</i>	<i>Meteon</i>	-	
Campo Maior	Centro Cultural	Piranómetro	CMP 3	Radiação Global	31/05/2013
		<i>Data Logger</i>	<i>Meteon</i>	-	
Gavião	Câmara Municipal	Piranómetro	CMP 3	Radiação Global	05/06/2013
		<i>Data Logger</i>	<i>Meteon</i>	-	
Marvão	Parque de Máquinas	Piranómetro	CMP 3	Radiação Global	06/11/2013
		<i>Data Logger</i>	<i>Meteon</i>	-	
Portalegre	ESTG-IPP	<i>Sun Tracker</i>	<i>Solys 2</i>	-	12/06/2013
		Pireliómetro	CHP 1	Radiação DNI	
		Piranómetro	CMP 6	Radiação Global	
		Piranómetro	CMP 6	Radiação Difusa	
		<i>Data Logger</i>	<i>Data Taker 82</i>	-	
Sousel	Câmara Municipal	Piranómetro	CMP 3	Radiação Global	12/06/2013
		<i>Data Logger</i>	<i>Meteon</i>	-	

### 3.2 Localização correta dos piranómetros

O local de instalação de piranómetros é um ponto fulcral para a obtenção de dados de Radiação solar fiáveis e válidos. Para que o piranómetro, ou outro sensor de medição de Radiação solar esteja bem instalado necessita de ter o horizonte completamente desimpedido de forma a não existir obstrução ou reflexão da Radiação solar.

No caso da componente Difusa da Radiação solar o piranómetro tem de ver todo o horizonte, ou seja  $180^\circ$  de forma a impedir que parte da Radiação solar Difusa seja bloqueada por uma determinada superfície. No exemplo da Figura 30 verifica-se obstrução dos raios solares por parte da superfície vertical originando momentos de sombreamento em que o sensor apenas irá captar uma parte da Radiação solar Difusa que será proporcional a  $[180^\circ - \Omega]$ .

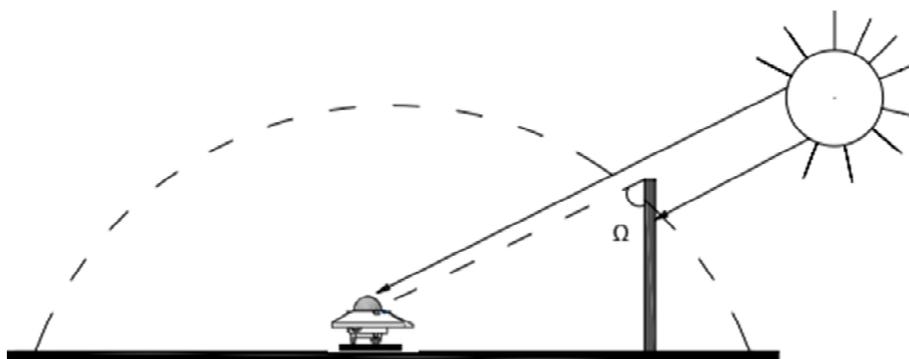


Figura 30 - Exemplo de obstrução dos raios solares.

Tanto no caso da componente Direta como da Difusa da Radiação solar uma superfície vertical como a que está representada na Figura 31 pode produzir fenómenos de reflexão da Radiação para o piranómetro dando origem a leituras erradas.

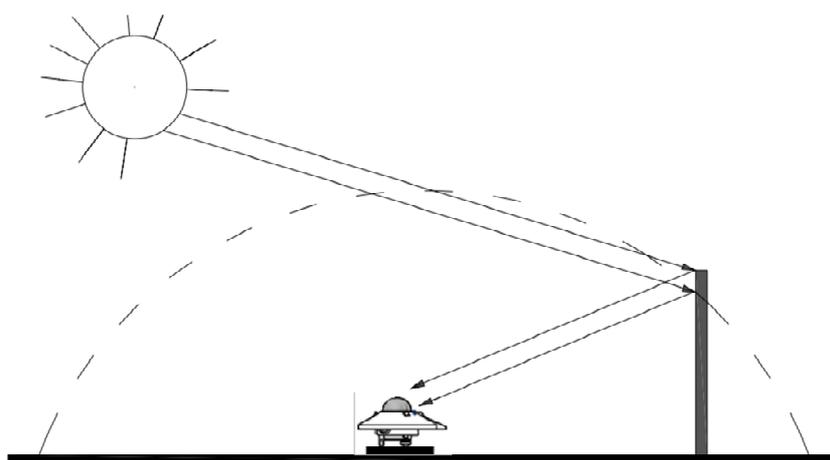


Figura 31 – Exemplo de reflexão dos raios solares.

Como é possível observar nas fotografias de cada local em alguns destes, especificamente nos concelhos de Alter do Chão, Avis, Marvão e Sousel, não estão cumpridas todas as condições relativas à correta instalação dos piranómetros. Estas exigem horizontes completamente desimpedidos, não só para que não haja bloqueio de partes do hemisfério de onde vem Radiação Difusa, como para que não haja reflexos de Global (Direta e Difusa) a falsear ambas as medidas.

De forma a resolver este problema informei os Municípios da situação e aconselhei a alteração dos piranómetros para os locais que sugeri. Até à data o Município de Alter do Chão e Marvão não procederam à alteração da localização dos piranómetros, sendo que são os caso mais críticos uma vez que a estação de Alter do Chão (Figura 22) está localizada entre duas torres com mais de dois metros de altura e a estação de Marvão (Figura 27) está instalada ao lado de um coletor solar térmico originando fenómenos de reflexão e obstrução da Radiação solar.

Por outro lado o Município de Sousel, no dia 14 de Novembro, procedeu à alteração da localização do Piranómetro para o local sugerido (Figura 32), tal como o Município de Avis no dia 20 de Novembro (Figura 33).



Figura 32 – Correta e nova localização da estação de Sousel.



Figura 33 – Correta e nova localização da estação de Avis.

### 3.3 Calibração das Estações Meteorológicas

Um dos trabalhos desenvolvidos no âmbito do presente estudo foi a calibração relativa dos piranómetros instalados, ou seja foram efetuadas medidas de Radiação Solar Global nas oito estações meteorológicas utilizando um piranómetro de classe superior (CMP11), cedido gentilmente pela UE, que se encontrava devidamente calibrado. O objetivo desta atividade foi verificar qual a diferença entre os valores medidos em cada uma das estações em relação ao piranómetro da UE.

Para a realização deste trabalho efetuaram-se medidas com intervalos de 30 segundos durante um período de 30 minutos permitindo obter cerca de 60 amostras para cada estação. Para a estação de Portalegre foi possível obter dados de 10 em 10 segundos durante um período de 30 minutos o que permitiu obter 180 amostras. Durante o período de medições os dois equipamentos de medida estiveram sincronizados de forma a obter-se uma comparação de resultados válida.

De seguida ilustram-se os gráficos (Figura 34 a Figura 41) obtidos para cada uma das estações onde é possível observar os valores obtidos através de cada um dos equipamentos de medida e a diferença de valores em percentagem associada às medições.

A diferença de valores não é constante ao longo do tempo nem igual em todas as estações verificando-se uma variação na ordem dos 2% a 9% para as estações periféricas e uma variação de 0% a 1% para a estação de central. Esta diferença de resultados entre as estações periféricas (CMP3) e a estação central (CMP6) pode ser justificada pela diferença de classes dos piranómetros e também pelas diferentes calibrações.

Através da análise dos oito gráficos é possível concluir que as leituras efetuadas pelo piranómetro da UE (CMP11) são sempre superiores às leituras efetuadas pelas estações na ordem dos 0% a 9%, como já tinha sido referido.

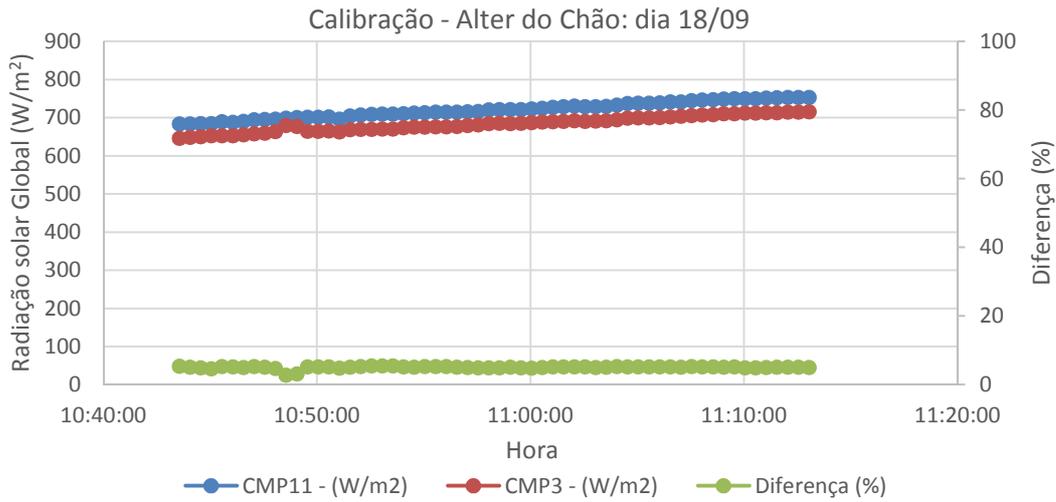


Figura 34 – Gráfico com os resultados da calibração efetuada em Alter do Chão.

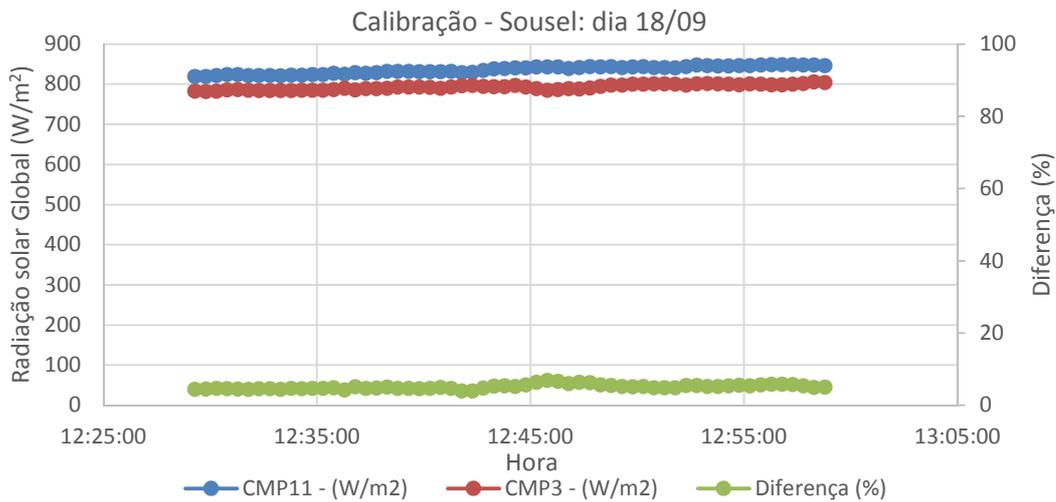


Figura 35 – Gráfico com os resultados da calibração efetuada em Sousel.

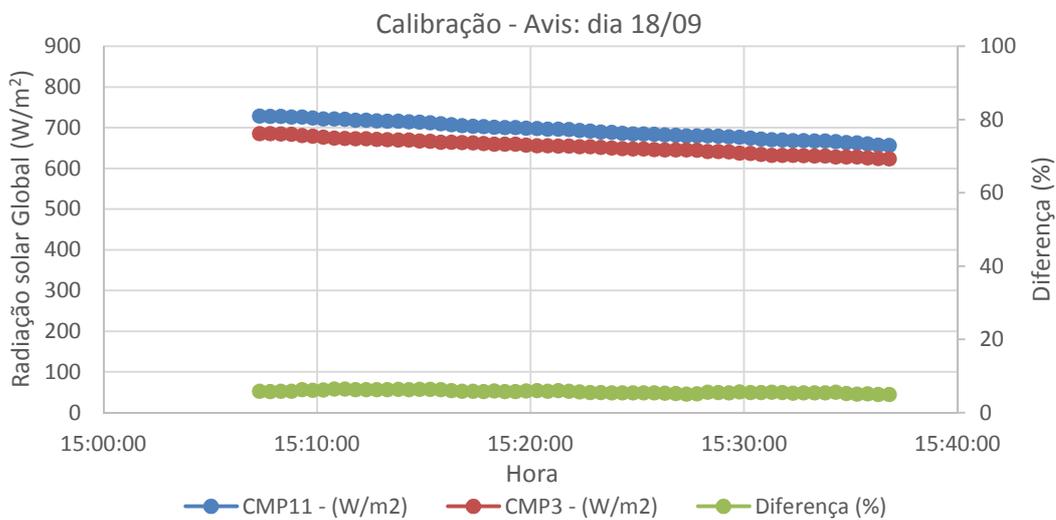


Figura 36 – Gráfico com os resultados da calibração efetuada em Avis.

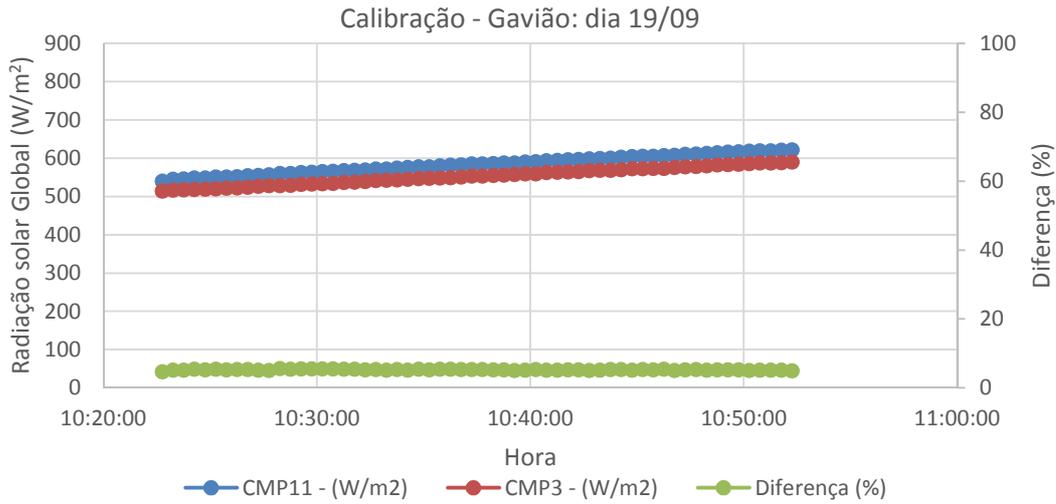


Figura 37 – Gráfico com os resultados da calibração efetuada em Gavião.

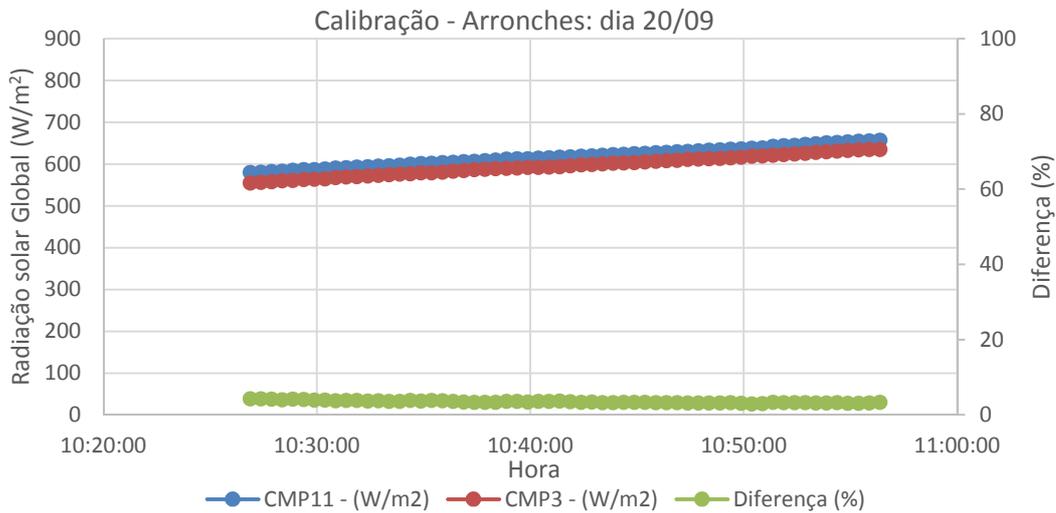


Figura 38 – Gráfico com os resultados da calibração efetuada em Arronches.

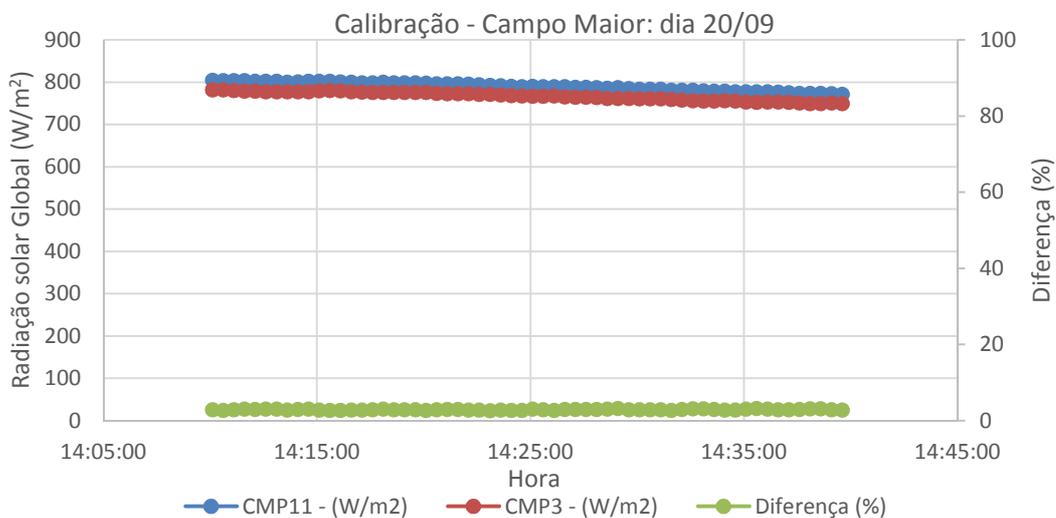


Figura 39 – Gráfico com os resultados da calibração efetuada em Campo Maior.

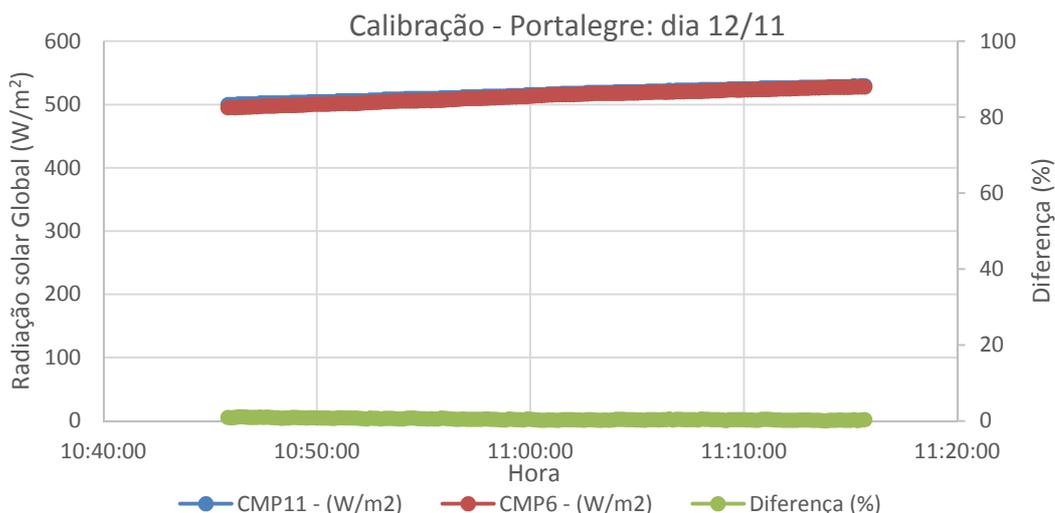


Figura 40 – Gráfico com os resultados da calibração efetuada em Portalegre.

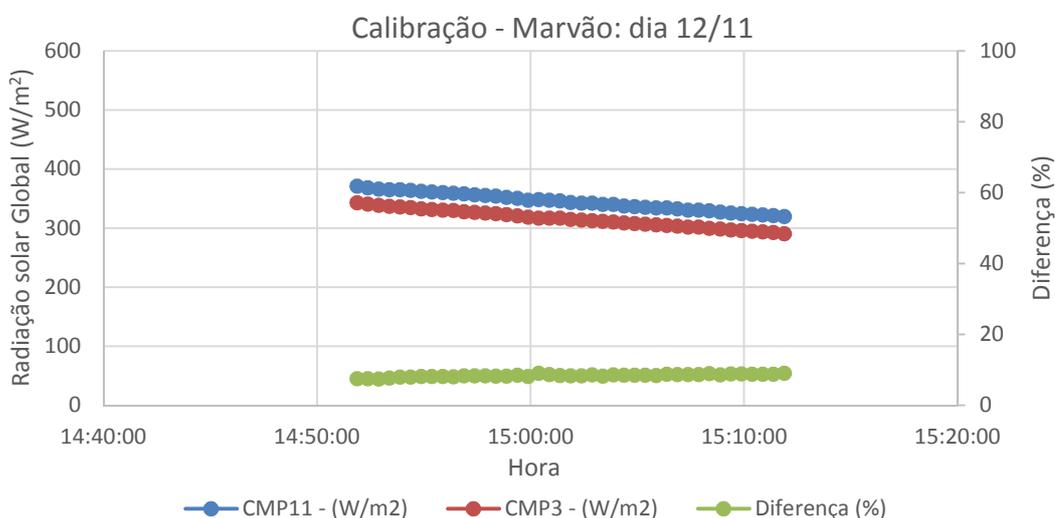


Figura 41 – Gráfico com os resultados da calibração efetuada em Marvão

Com este trabalho pretende-se diminuir o erro relativo associado às medições nas várias estações através da obtenção de um coeficiente que permite colocar todos os dados na mesma base estabelecida pelo piranómetro da UE de forma a homogeneizar os dados e a respetiva análise.

Nos gráficos a diferença entre os valores medidos é dada pela equação 3.1. No Quadro 3 encontram-se os coeficientes obtidos para cada umas das estações meteorológicas que foi obtido através da equação 3.2.

$$\text{Diferença}_{\text{estação}} = \frac{I_{h-\text{CMP11}} - I_{h-\text{estação}}}{I_{h-\text{CMP11}}} \times 100 \quad [\%] \quad 3.1$$

Em que  $I_{h-CMP11}$  é a Radiação solar Global medida a cada intervalo de tempo pelo piranómetro da UE, expresso em  $W/m^2$ . Por outro lado  $I_{h-estação}$  é a Radiação solar Global medida no mesmo intervalo de tempo pelo piranómetro da respetiva estação, expresso em  $W/m^2$ .

$$\text{coeficiente}_{\text{estação}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{amostra}}} \frac{I_{h-CMP11}}{I_{h-estação}}}{N_{\text{amostra}}} \quad 3.2$$

Em que  $N_{\text{amostra}}$  é o número total de valores medidos em cada estação meteorológica.

Quadro 3 – Coeficientes para a base definida pelo Piranómetro da UE.

	<b>Alter do Chão</b>	<b>Arronches</b>	<b>Avis</b>	<b>Campo Maior</b>
<b>Coeficiente</b>	1,054	1,036	1,061	1,030
	<b>Gavião</b>	<b>Marvão</b>	<b>Portalegre</b>	<b>Sousel</b>
<b>Coeficiente</b>	1,056	1,092	1,005	1,054

### 3.4 Análise da Radiação solar Global

Nesta secção é efetuada a análise da Radiação solar Global medida nas várias estações meteorológicas instaladas nos Municípios do Alto Alentejo e comparação com os dados obtidos na estação meteorológica do CGE em Évora (Herdade da Mitra) no período compreendido entre Agosto e Dezembro de 2013 inclusive. Os dados apresentados ( $I_{h-base}$ ) são os dados já convertidos (equação 3.3) a partir dos coeficientes determinados para cada estação. Para cada mês são apresentados os seguintes tipos de gráficos:

- Variação mensal da Radiação solar Global média diária;
- Variação mensal da Irradiação solar Global média diária;
- Média mensal da Radiação/Irradiação solar Global.

$$I_{h-base} = \text{coeficiente}_{\text{estação}} \times I_{h-estação} \quad [W/m^2] \quad 3.3$$

Os valores médios diários da Radiação solar Global -  $\bar{I}_h$  (W/m<sup>2</sup>) para cada estação meteorológica são obtidos através da equação 2.17 e os valores médios diários da Irradiação solar Global -  $\bar{H}_h$  (MJ/m<sup>2</sup>) são obtidos através da expressão 2.16.

### 3.4.1 Agosto

Devido a diversos problemas como por exemplo atraso na instalação das estações meteorológicas periféricas e devido a erros de programação na estação meteorológica central apenas foi possível começar a recolher dados de Radiação solar em alguns Municípios durante o mês de Agosto. De salientar que o problema de programação da estação de Portalegre apenas ficou resolvido durante o mês de Novembro pelo que antes dessa data só existem dados disponíveis de Radiação solar DNI.

O presente estudo iniciou-se no mês de Agosto tendo sido possível adquirir dados para Alter do Chão, Arronches, Avis, Campo Maior, Gavião e Sousel. Contudo as estações de Alter do Chão e Gavião só começaram a medir no dia 22, e a estação de Avis no dia 2. Por outro lado no período compreendido entre dia 8 e 22 não foi possível obter dados para Campo Maior devido a falta de bateria no sistema de aquisição de dados (*Meteon*), enquanto que na estação de Sousel não existem dados desde dia 22 até dia 12 de Setembro devido a um erro na recolha por parte do técnico do Município que conduziu à perda dos dados.

O gráfico da Figura 42 ilustra a variação mensal da Radiação solar Global média diária nos Municípios supracitados durante o mês de Agosto. De uma forma geral os Municípios analisados apresentam um comportamento semelhante ao longo do mês, ou seja, verifica-se um decréscimo da Radiação solar Global média diária em que nos primeiros dias do mês registam-se valores na ordem dos 550 a 600 W/m<sup>2</sup> e no fim do mês os valores obtidos foram da ordem dos 450 a 500 W/m<sup>2</sup>.

Os Municípios de Sousel e Arronches registaram os valores de Radiação solar Global mais elevados, sendo que o valor máximo (607,6 W/m<sup>2</sup>) registou-se no dia 8 em Sousel.

Em termos comparativos com Évora os valores obtidos em Sousel são bastante semelhantes aos valores registados em Évora. Por outro lado, a nível da variação da Radiação solar Global ao longo do mês a variação em Évora é muito idêntica à variação da Radiação solar Global nos Municípios do Alto Alentejo.

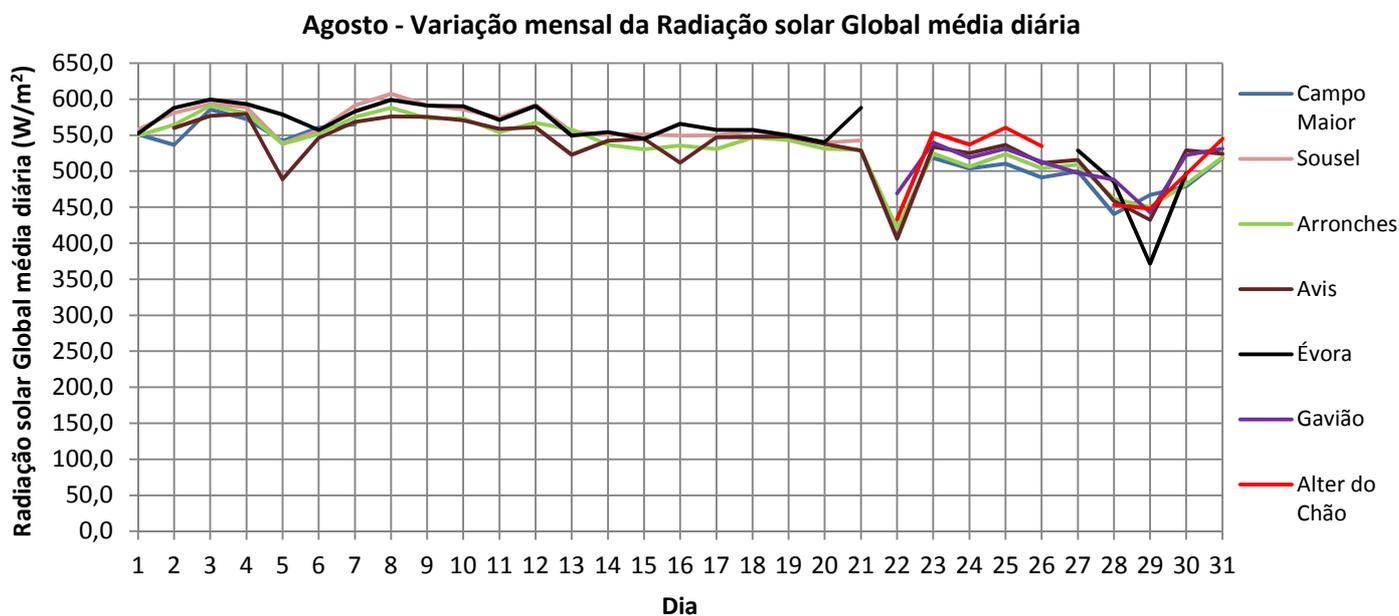


Figura 42 – Gráfico com a variação mensal da Radiação solar Global média diária para o mês de Agosto e comparação com os dados de Évora.

A nível energético, ou seja a quantidade de Irradiação solar Global média diária por unidade de área ( $1\text{m}^2$ ) que chega a uma determinada superfície horizontal ilustra-se no gráfico da Figura 43 para o mês de Agosto.

Através da análise do gráfico verifica-se uma diminuição da Irradiação solar diária ao longo do mês. No início do mês registaram-se os valores mais altos com variações entre os 24 e os 29  $\text{MJ/m}^2$ , enquanto no final do mês a variação rondou os 18 a 24  $\text{MJ/m}^2$ . A diminuição dos valores durante o mês de Agosto deve-se a uma diminuição do período de insolação solar que está relacionado com a transição de estação: Verão – Outono.

Arronches e Sousel registaram os valores mais elevados ao longo do mês, contudo a diferença de valores não é muito acentuada. Em termos comparativos com Évora verifica-se uma variação mensal semelhante à registada nos Municípios do Alto Alentejo, com valores da mesma ordem de grandeza, contudo Évora regista os maiores picos de Irradiação solar Global, tanto positivos ( $30,01\text{ MJ/m}^2$  no dia 3) como negativos ( $17,31\text{ MJ/m}^2$  no dia 29).

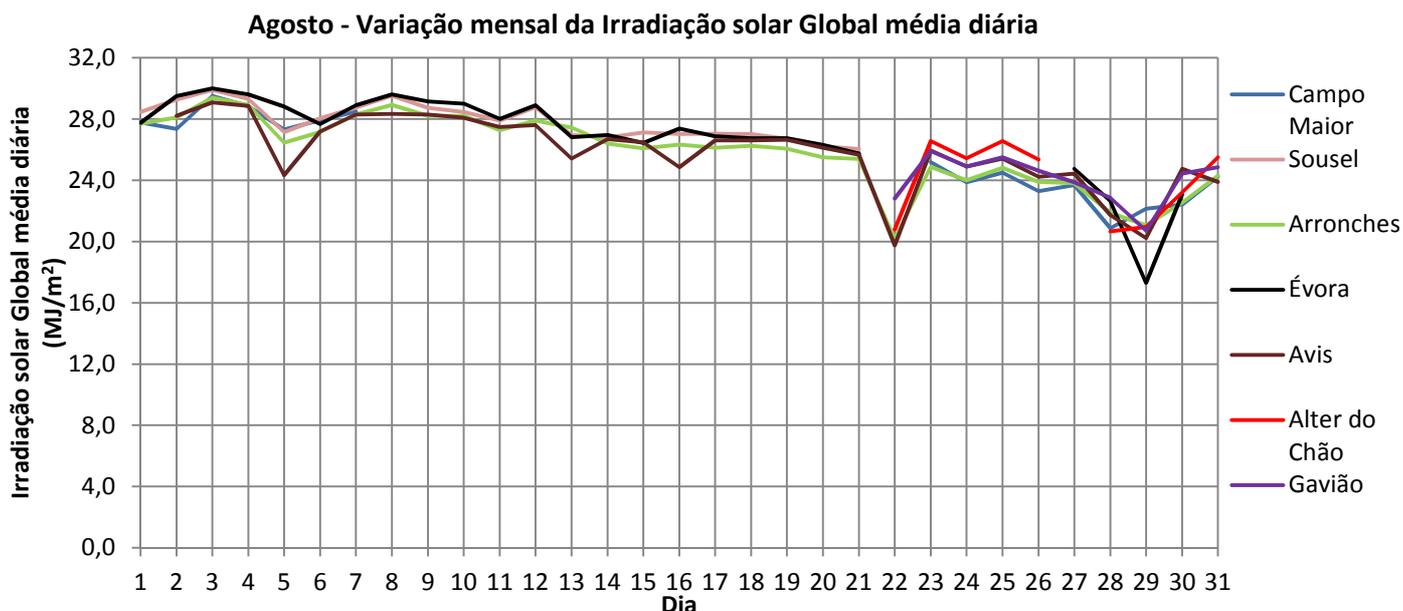


Figura 43 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Global média diária para o mês de Agosto e comparação com os dados de Évora.

Como síntese mensal ilustra-se de seguida na Figura 44 e Figura 45 os gráficos com as médias mensais da Radiação solar Global ( $\bar{I}_{h\text{-mensal}}$ ) e da Irradiação solar Global ( $\bar{H}_{h\text{-mensal}}$ ) para o mês de Agosto nos vários Municípios do Alto Alentejo e em Évora. Os valores médios mensais foram obtidos a partir das seguintes equações:

$$\bar{I}_{h\text{-mensal}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{dia}}} \bar{I}_h}{n_{\text{dia}}} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad 3.4$$

$$\bar{H}_{h\text{-mensal}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{dia}}} \bar{H}_h}{n_{\text{dia}}} \quad [\text{MJ}/\text{m}^2] \quad 3.5$$

Em que  $n_{\text{dia}}$  é o número total de dias do mês.

A análise do gráfico da Figura 44 permite concluir que o Município de Sousel, em termos médios, apresenta uma incidência de Radiação solar Global diária ( $566,8 \text{ W}/\text{m}^2$ ) superior aos restantes Municípios e também em relação ao ponto de referência (Évora –  $555,3 \text{ W}/\text{m}^2$ ). Por outro lado Gavião é o Município que apresenta uma menor incidência de Radiação solar Global diária -  $478,5 \text{ W}/\text{m}^2$ , contudo estes valores têm baixo valor estatístico uma vez que este Município apenas registou dados nos últimos 10 dias do mês, não sendo possível retirar uma conclusão global. Contudo a média mensal para o Alto Alentejo é de  $527,7 \text{ W}/\text{m}^2$  para o mês de Agosto.

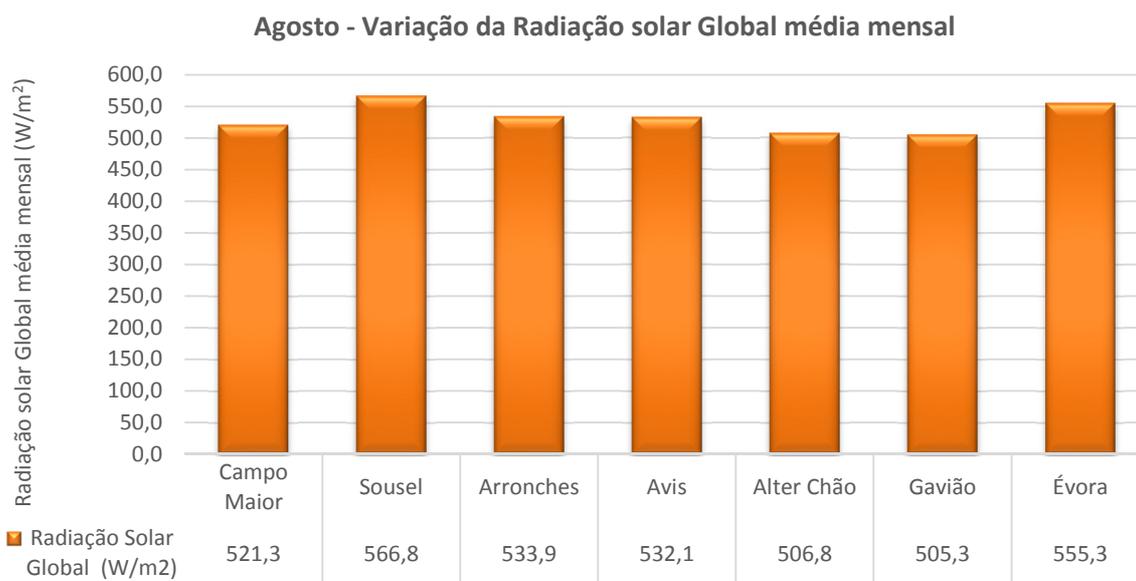


Figura 44 – Gráfico com a média mensal da Radiação solar Global para Agosto e comparação com Évora.

A nível energético (Figura 45) é também no Município Sousel que se verifica em termos médios diários uma maior quantidade de energia incidente ( $27,9 \text{ MJ/m}^2$ ), com uma diferença de  $4 \text{ MJ/m}^2$  em relação ao valor mais baixo – Gavião.

Em termos comparativos e de uma forma geral os Municípios do Alto Alentejo registaram valores inferiores aos registados na cidade de Évora com exceção para o Município de Sousel, sendo a média mensal para o Alto Alentejo de  $25,52 \text{ MJ/m}^2$ .

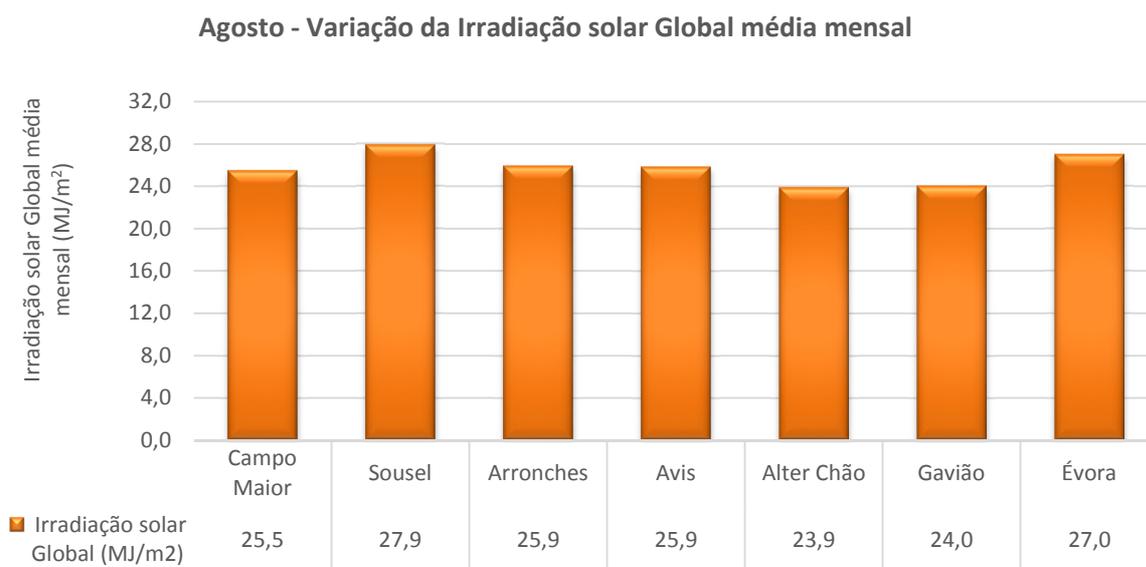


Figura 45 – Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global para Agosto e comparação com Évora.

### 3.4.2 Setembro

Durante o mês de Setembro ocorreram diversos problemas que conduziram à perda de dados. Em Sousel devido a um erro na recolha de dados perderam-se os dados desde 22 de Agosto até 12 de Setembro como já tinha sido referido. Por outro lado em Gavião verificou-se um erro de programação do 'Meteon' que impediu a aquisição de dados durante o período de 11 a 19 de Setembro. Por fim em Campo Maior o sistema de aquisição de dados ficou sem bateria e conseqüentemente perderam-se os dados de 20 a 30 de Setembro.

É de salientar que no dia 11 em Campo Maior, o equipamento registou erros de leitura anormais durante todo o dia não sendo possível apresentar dados para o respetivo dia. De 26 a 28 de Setembro voltaram-se a registar erros de leitura instantâneos em alguns Municípios.

Existem várias razões e explicações para a ocorrência destes erros sendo uma delas a classe do equipamento que neste caso são piranómetros (CMP3) de baixa classe ou seja de Segunda Classe e portanto são mais sugestíveis a este tipo de erros. Outra das razões e talvez a mais provável uma vez que o Verão passado foi bastante quente, tem a ver com mudanças bruscas de temperatura que podem originar valores positivos ou negativos de curta duração até que o sensor se ajuste à variação de temperatura ocorrida. Essas variações de temperatura também podem ser causadas por um aumento repentino do índice de nuvem no céu, ou até mesmo chuva e acumulação de poeiras.

Na Figura 46 ilustra-se a variação mensal da Radiação solar Global média diária, em que as estações meteorológicas analisadas apresentam variações muito semelhantes ao longo do mês, com valores muito idênticos, verificando-se pequenas dispersões entre os vários Municípios do Alto Alentejo e Évora.

Até ao dia 20 de Setembro a Radiação solar Global média diária toma valores entre os 400 e os 550 W/m<sup>2</sup> verificando-se um pico negativo no dia 5 (328,1 W/m<sup>2</sup> – Arronches) e um pico positivo no dia 18 (675,2 W/m<sup>2</sup> – Sousel). Até ao final do mês verifica-se uma queda acentuada da média diária da Radiação solar Global que resulta de dias com bastantes nuvens e com períodos de chuva.

Em termos comparativos os Municípios do Alto Alentejo, alvo desta análise apresentam um comportamento bastante semelhante ao registado em Évora (ponto de referência) ao longo do mês de Setembro como se pode contactar pela observação da Figura 46.

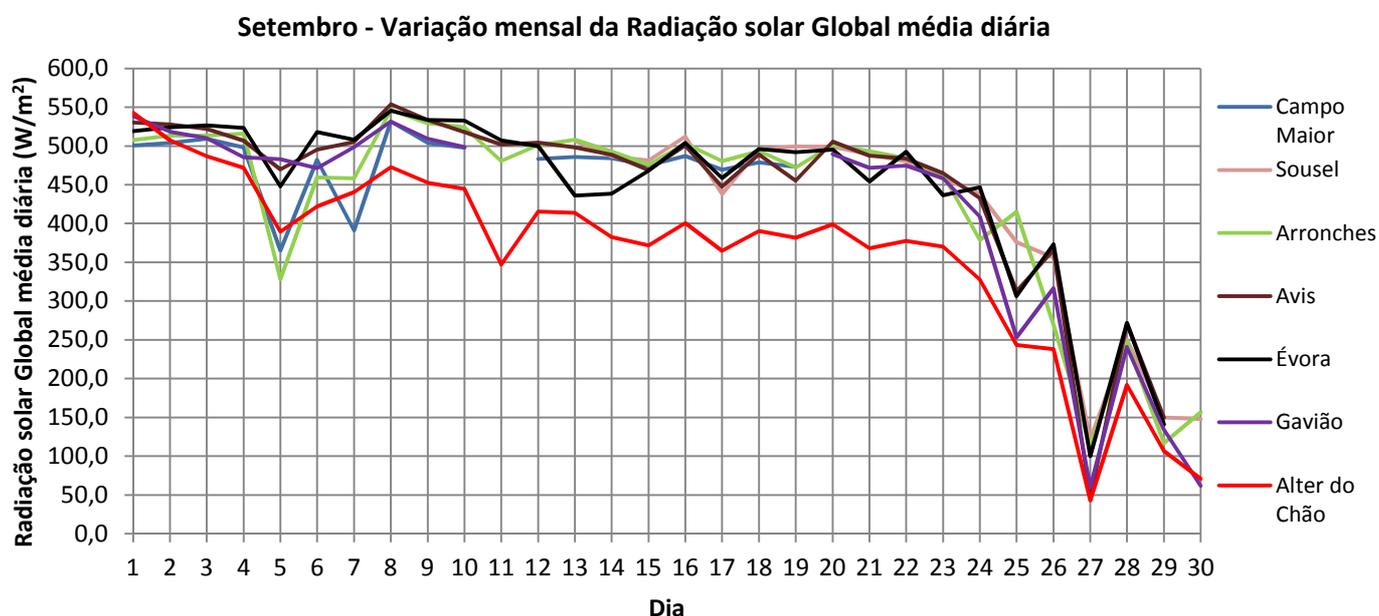


Figura 46 – Gráfico com a variação mensal da Radiação solar Global média diária para o mês de Setembro e comparação com os dados de Évora.

No gráfico da Figura 47 ilustra-se a variação mensal em termos energéticos da Irradiação solar Global média diária para cada uma das estações em análise. De um modo geral até ao dia 22 de Setembro a Irradiação solar Global diária diminui de uma forma pouco acentuada, apresentando valores entre os 16 e os 24 MJ/m<sup>2</sup> verificando-se um pico negativo no dia 5 (14,6 MJ/m<sup>2</sup> – Arronches) e um pico positivo no dia 2 (24,1 MJ/m<sup>2</sup> – Avis).

Até ao final do mês verifica-se uma queda acentuada da Irradiação solar Global diária com varias oscilações, sendo esta quebra explicada pelos dias chuvosos com muitas nuvens e céu nublado que provocam a obstrução da Radiação solar.

Pode-se verificar tanto no gráfico da Figura 46 como no gráfico da Figura 47 que os valores registados para a estação meteorológica de Alter do Chão são inferiores aos registados nas restantes estações devido à incorreta localização do piranómetro que prova fenómenos de obstrução dos raios solares.

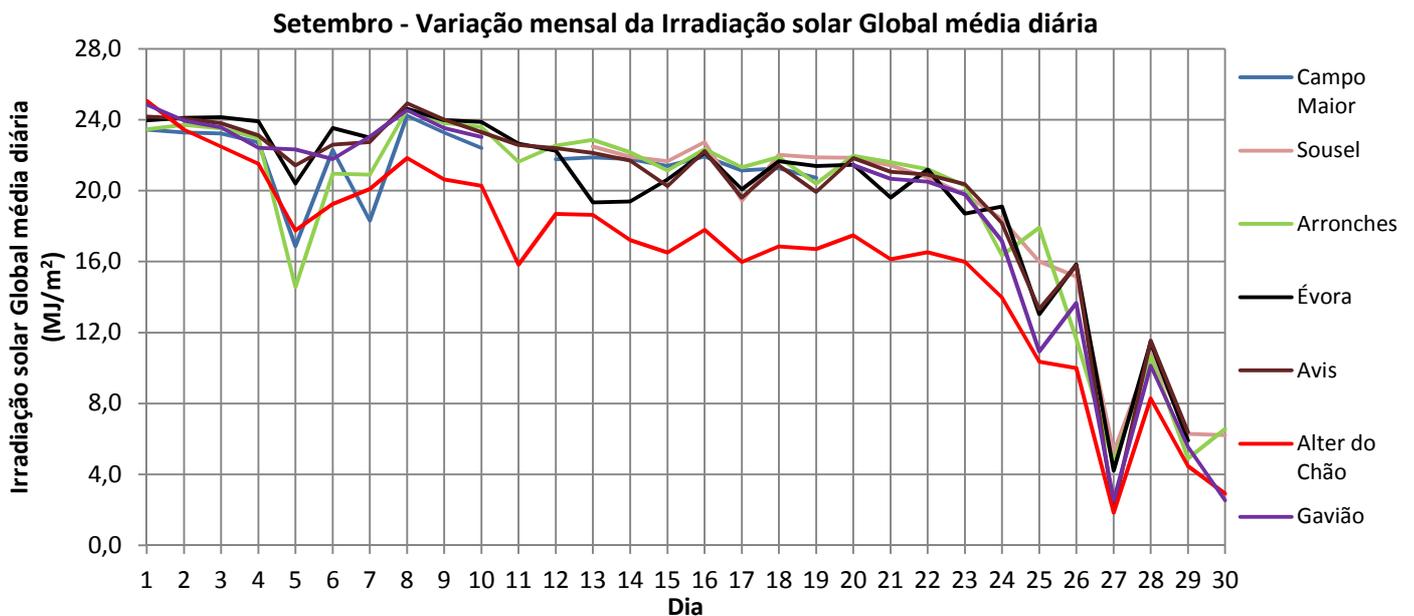


Figura 47 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Global média diária para o mês de Setembro e comparação com os dados de Évora.

De forma a concluir a análise mensal de Setembro ilustra-se de seguida na Figura 48 e Figura 49 os gráficos de síntese com as médias mensais da Radiação solar Global e da Irradiação solar Global para o mês de Setembro nos vários Municípios do Alto Alentejo e em Évora. Os valores médios mensais foram obtidos a partir das equações 5.4 e 5.5.

A análise do gráfico da Figura 48 permite concluir que o Município de Campo Maior, em termos médios, apresenta uma incidência de Radiação solar Global diária ( $479 \text{ W/m}^2$ ) superior aos restantes Municípios e também em relação ao ponto de referência (Évora –  $448 \text{ W/m}^2$ ).

Relativamente ao mês anterior (Agosto -  $527,7 \text{ W/m}^2$ ) verifica-se uma diminuição na Radiação solar Global média mensal nos Municípios do Alto Alentejo (Setembro –  $431,96 \text{ W/m}^2$ ) devido ao agravamento das condições atmosféricas que ocorreram entre os dois meses. De salientar que para a média mensal de Setembro já não foi contabilizado o valor referente à estação de Alter do Chão devido à incorreta localização da mesma.

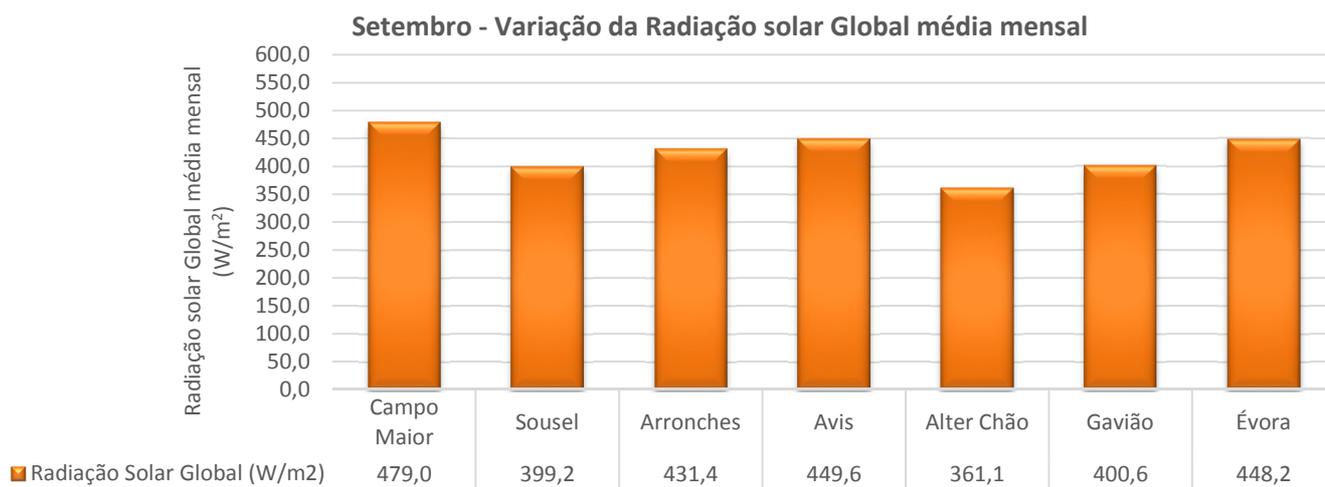


Figura 48 – Gráfico com a média mensal da Radiação solar Global para Setembro e comparação com Évora.

No que diz respeito à energia média mensal incidente, é também no Município Campo Maior que se verifica em termos médios diários uma maior quantidade de energia incidente ( $21,8 \text{ MJ/m}^2$ ), com uma diferença de  $5,6 \text{ MJ/m}^2$  em relação ao valor mais baixo – Alter do Chão. Contudo esta diferença de valores carece de fiabilidade porque a estação de Campo Maior não registou valores nos últimos dez dias do mês, dias durante os quais os valores de Irradiação foram mais baixos.

Em termos comparativos e de uma forma geral os Municípios do Alto Alentejo registaram uma diminuição de aproximadamente  $6 \text{ MJ/m}^2$  relativamente ao mês anterior, sendo que a média mensal de Setembro no Alto Alentejo é de  $19,26 \text{ MJ/m}^2$ . Por outro lado os valores registados no Alto Alentejo são relativamente idênticos aos registados na cidade de Évora ( $19,8 \text{ MJ/m}^2$ ).

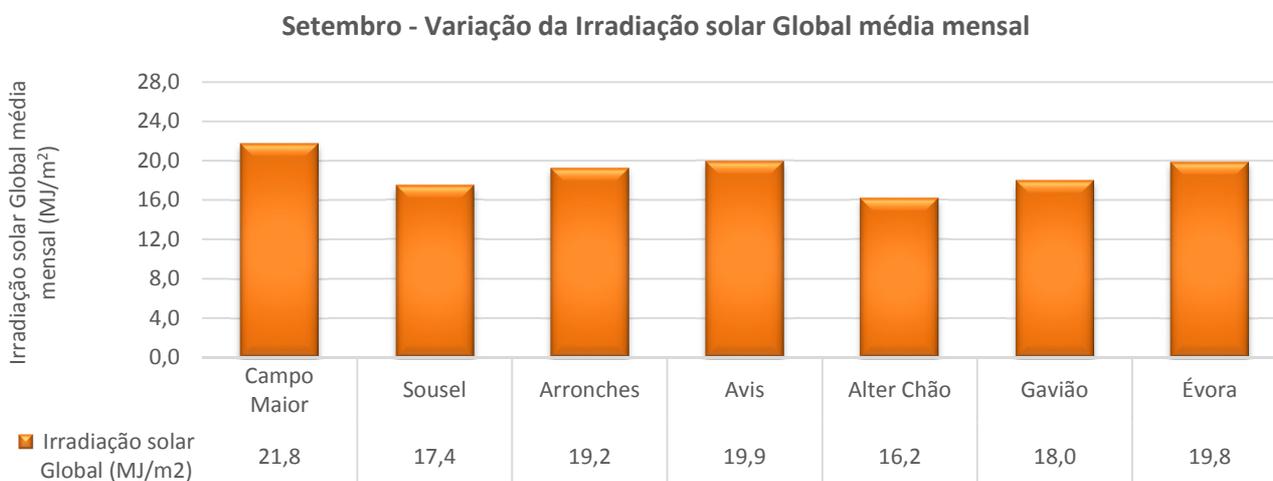


Figura 49 – Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global para Setembro e comparação com Évora.

### 3.4.3 Outubro

Para o período de 1 a 4 de Outubro na estação de Campo Maior e para o período de 26 a 31 de Outubro na estação de Arronches não existem dados de Radiação solar devido a falta de bateria no sistema de aquisição de dados. Por outro lado durante o período de 18 a 31 de Outubro também não existem dados para a estação de Alter do Chão devido a um erro no sistema de aquisição de dados que impediu a recolha de dados.

Na Figura 50 é possível observar o gráfico referente à variação mensal da Radiação Global média diária a partir do qual é possível concluir que os Municípios apresentam um comportamento semelhante, com diversos picos positivos e negativos ao longo do mês devido às condições atmosféricas ocorridas, nomeadamente chuva e períodos de céu nublado que influenciam de forma negativa a captação de Radiação solar.

De uma forma geral os valores da Radiação solar Global oscilaram entre os 50 W/m<sup>2</sup> e os 500 W/m<sup>2</sup> registando-se o valor mais alto (495 W/m<sup>2</sup>) no dia 7 de Outubro em Avis. Em termos comparativos verifica-se que os Municípios apresentam valores semelhantes e o mesmo comportamento ao longo do mês quando comparado com os valores de Évora, à semelhança do que se verificou nos meses anteriores.

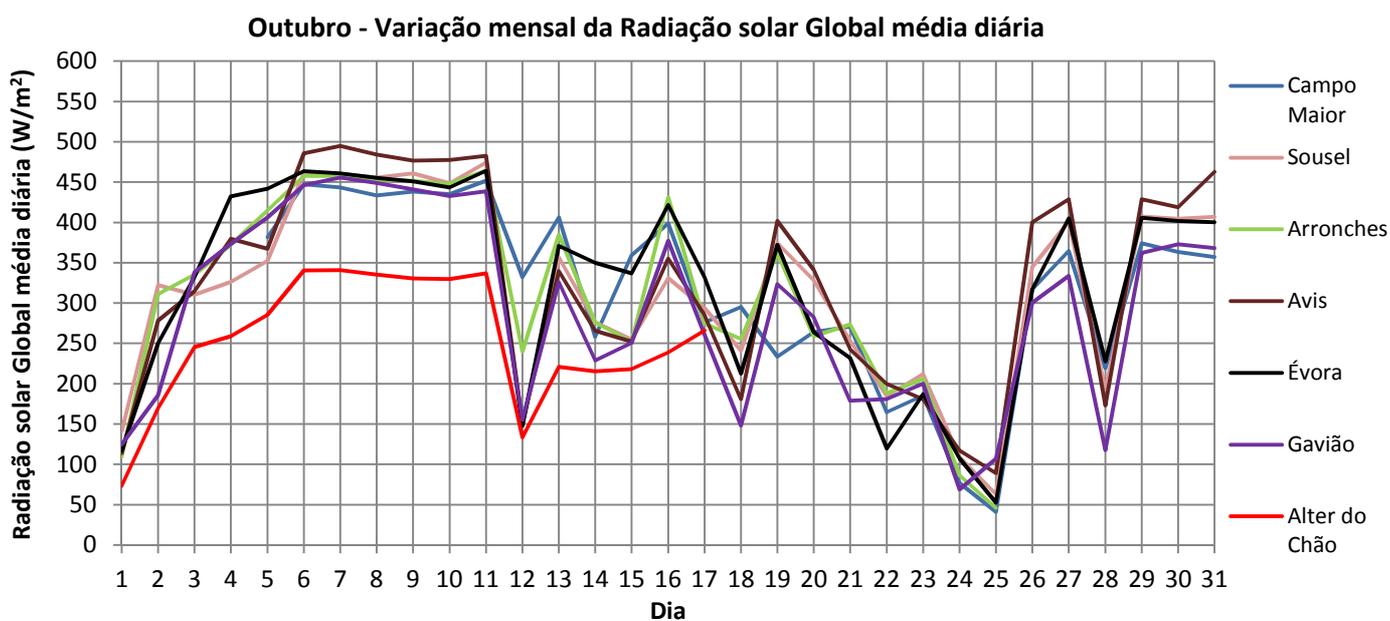


Figura 50 – Gráfico com a variação mensal da Radiação solar Global média diária para o mês de Outubro e comparação com os dados de Évora.

Em termos energéticos é apresentado o gráfico da Figura 51 através da análise do qual se pode concluir que ao longo do mês registaram-se várias oscilações na ordem dos 2 MJ/m<sup>2</sup> a 20 MJ/m<sup>2</sup> devido às diferentes condições meteorológicas ocorridas durante o mês de Outubro. Através do gráfico pode-se constatar que Gavião (retirando Alter do Chão que não cumpre as condições de instalação adequadas) é o Município que apresenta uma menor incidência de Irradiação solar Global.

O valor máximo mensal registado foi de 20,2 MJ/m<sup>2</sup> no dia 7 na estação de Avis, enquanto o valor mínimo mensal foi de 1,55 MJ/m<sup>2</sup> na estação de Campo Maior. Em comparação com o ponto de referência (Évora) os Municípios do Alto Alentejo alvo do presente estudo apresentam um comportamento semelhante ao registado em Évora durante o mês de Outubro como se pode constatar no gráfico da Figura 51.

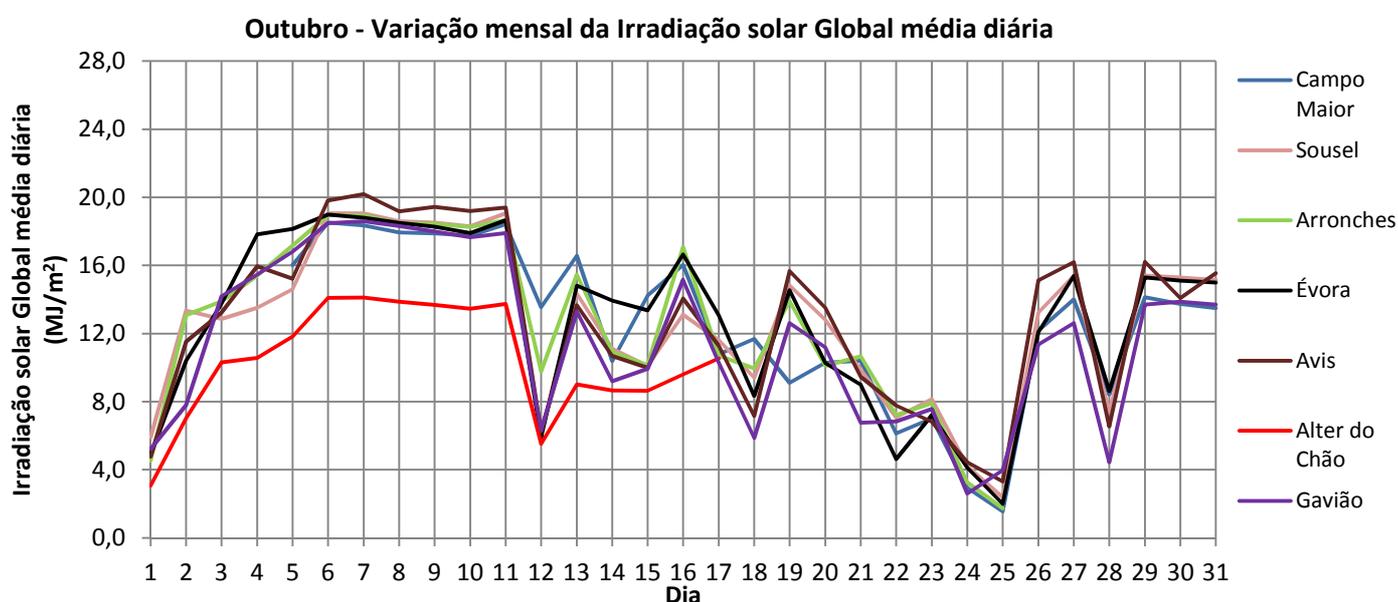


Figura 51 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Global média diária para o mês de Outubro e comparação com os dados de Évora.

A Figura 52 ilustra o gráfico com a média mensal da Radiação solar Global da Irradiação para Outubro, cuja análise permite concluir o Município de Avis, em termos médios, apresenta uma incidência de Radiação solar Global diária ligeiramente superior relativamente aos restantes Municípios, inclusive em relação ao ponto de referência (Évora).

Em termos globais o Alto Alentejo apresenta uma média de Radiação solar Global de 312,5 W/m<sup>2</sup> em Outubro (exceto Alter do Chão), cerca de menos 9,3 W/m<sup>2</sup> do que em Évora (321,8 W/m<sup>2</sup>).

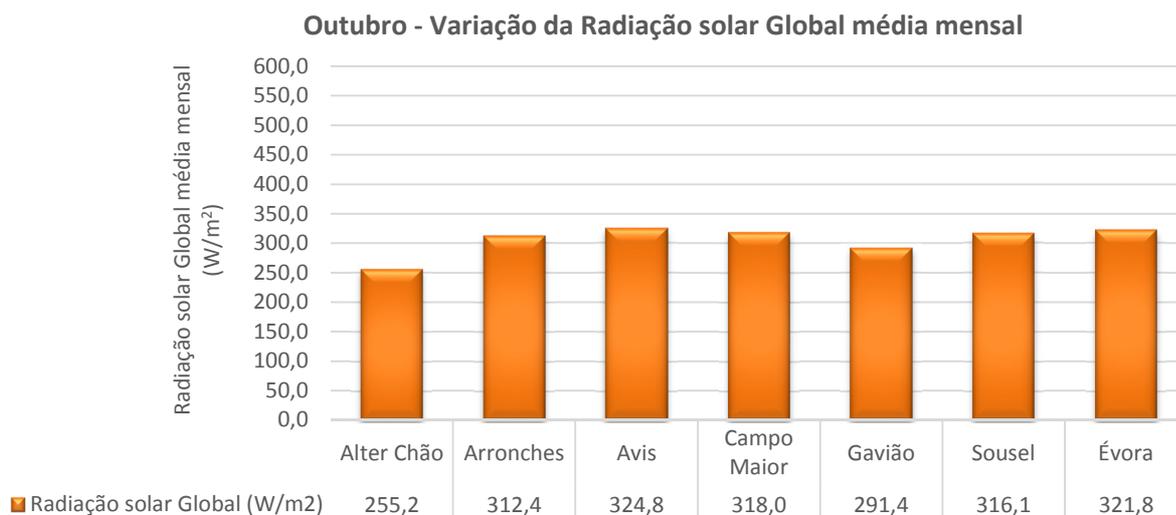


Figura 52 – Gráfico com a média mensal da Radiação solar Global para Outubro e comparação com Évora.

A nível energético (Figura 53) é também no Município de Avis que se verifica em termos médios diários uma maior quantidade de energia incidente, ainda que essa diferença seja pouco considerável relativamente aos restantes Municípios.

No global, os Municípios para os quais foi possível obter dados para o mês de Outubro apresentam uma Irradiação solar Global média de 12,1 MJ/m<sup>2</sup> em Outubro, ou seja menos 0,7 MJ/m<sup>2</sup> do que em Évora que regista uma média mensal de 12,8 MJ/m<sup>2</sup>.

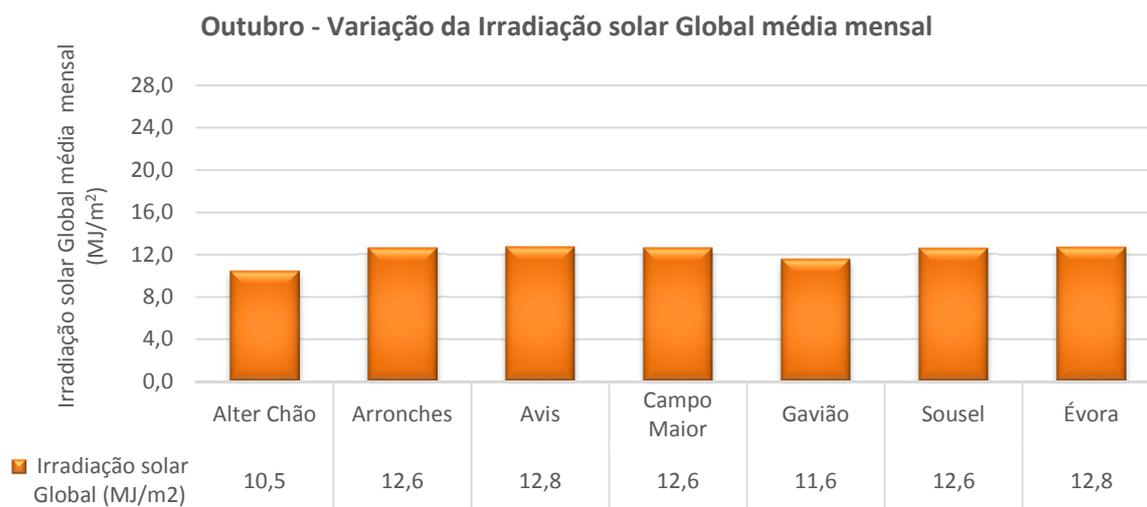


Figura 53 – Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global para Outubro e comparação com Évora.

#### 3.4.4 Novembro

No mês de Novembro foi possível obter os primeiros dados de Radiação solar Global da estação de Portalegre após a resolução da avaria que impediu a obtenção de dados até à data mencionada. Por outro lado a estação de Marvão iniciou as suas medições a 7 de Novembro, porém o local de instalação da estação não é o mais adequado pelo que os dados recolhidos podem induzir em erro.

Devido a perda de contacto entre o piranómetro e o sistema de aquisição de dados apenas foi possível obter dados da estação de Alter do Chão a partir do dia 4 de Novembro. Por outro lado no dia 6 de Novembro ocorreu uma falha na estação de Sousel pelo que o dia foi excluído da análise.

Torna-se a referir que a estação de Sousel sofreu uma alteração na sua localização no dia 14 de Novembro e a estação de Avis no dia 20, sendo que à data as estações encontram-se corretamente instaladas.

Na Figura 54 é possível observar o gráfico referente à variação mensal da Radiação solar Global média diária para o mês de Novembro. O comportamento da Radiação solar Global é bastante variável ao longo do mês verificando-se diversos picos, devendo-se este facto às condições climatéricas ocorridas nesse mesmo período, nomeadamente alternância entre períodos de céu nublado e períodos com aberturas de sol.

O Município de Avis regista o valor máximo mensal da Radiação solar Global média diária no dia 10 ( $419,2 \text{ W/m}^2$ ). Por outro lado no dia 22 regista-se o valor mínimo mensal de  $72,6 \text{ W/m}^2$  na estação de Alter do Chão. Em termos comparativos no Alto Alentejo verifica-se um comportamento semelhante relativamente a Évora, de forma idêntica aos meses anteriores.

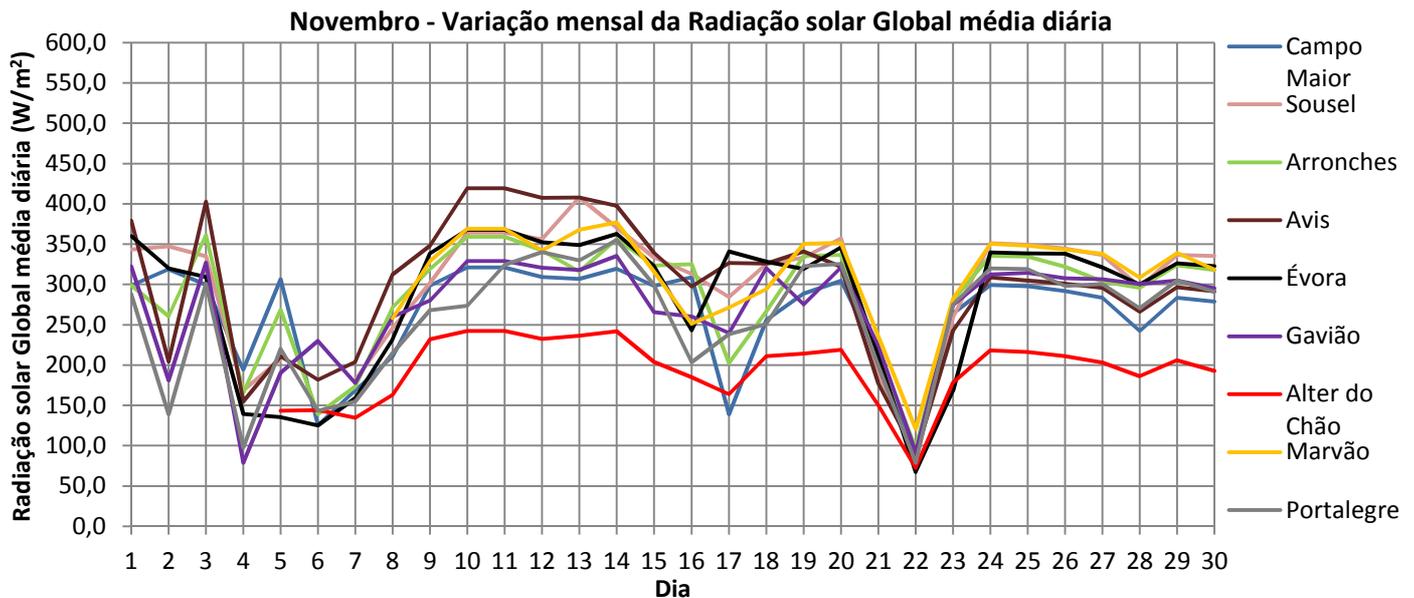


Figura 54 – Gráfico com a variação mensal da Radiação solar Global média diária para o mês de Novembro e comparação com os dados de Évora.

A Figura 55 ilustra o gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Global diária no Alto Alentejo e respetiva comparação com os dados de Évora, em que ao longo do mês de Novembro os valores variaram entre os 2 e os 14 MJ/m<sup>2</sup> sendo que o valor máximo diário mensal registado foi de 14,4 MJ/m<sup>2</sup>, no dia 12, na estação de Marvão. Por outro lado o valor mínimo registou-se na estação de Alter do Chão no dia 22, sendo o valor de 2,53 MJ/m<sup>2</sup>.

No que se refere à comparação com Évora volta-se a verificar que o comportamento registado nas estações meteorológicas do Alto Alentejo é idêntico ao registado na estação meteorológica de Évora.

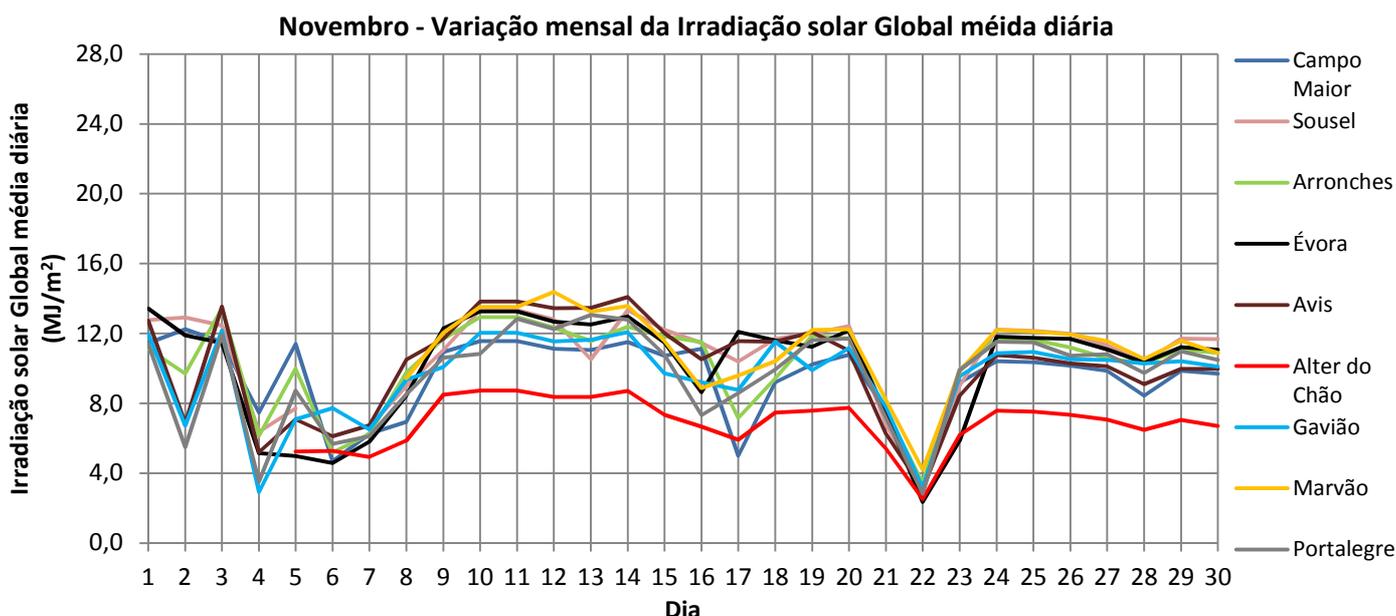


Figura 55 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Global média diária para o mês de Novembro e comparação com os dados de Évora.

Como síntese para o mês de Novembro ilustra-se de seguida na Figura 56 e Figura 57 as médias mensais da Radiação solar Global e da Irradiação solar Global para todas as estações meteorológicas em análise.

Através da análise do gráfico da Figura 56 conclui-se que o Município de Marvão durante o mês de Novembro, em termos médios, apresenta uma incidência de Radiação solar Global (314,4 W/m<sup>2</sup>) diária ligeiramente superior aos restantes Municípios em análise e também em relação ao ponto de referência (Évora – 285,1 W/m<sup>2</sup>). Por outro lado Alter do Chão é o Município que apresenta uma menor incidência de Radiação solar Global diária em comparação com os restantes Municípios, devendo-se este facto em grande parte à incorreta localização da estação meteorológica.

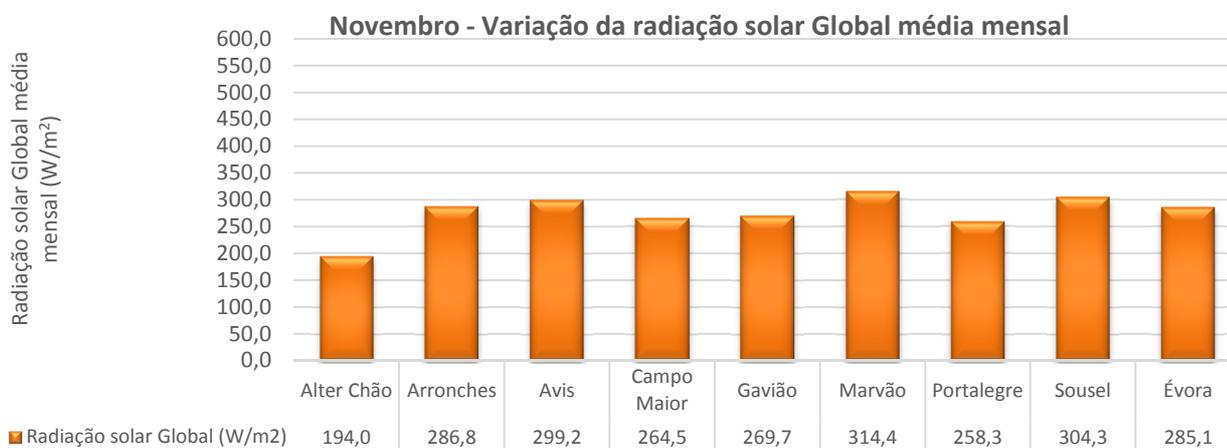


Figura 56 – Gráfico com a média mensal da Radiação solar Global para Novembro e comparação com Évora.

Relativamente à energia incidente (Figura 57) por unidade de área no plano horizontal a média mensal dos Municípios do Alto Alentejo (exceto Alter do Chão) ronda os 10,2 MJ/m<sup>2</sup>, sendo que o Município que apresenta uma maior Irradiação solar Global média mensal foi Marvão com uma média mensal de 11,2 MJ/m<sup>2</sup>.

Efetuada uma comparação com a estação de Évora verifica-se que a média mensal é igual em Évora e no Alto Alentejo, ou seja 10,2 MJ/m<sup>2</sup>. Tal comparação indica que no mês de Novembro a energia solar incidente nos dois locais, em termos médio mensal, foi bastante semelhante apesar da distância relativa entre as estações.

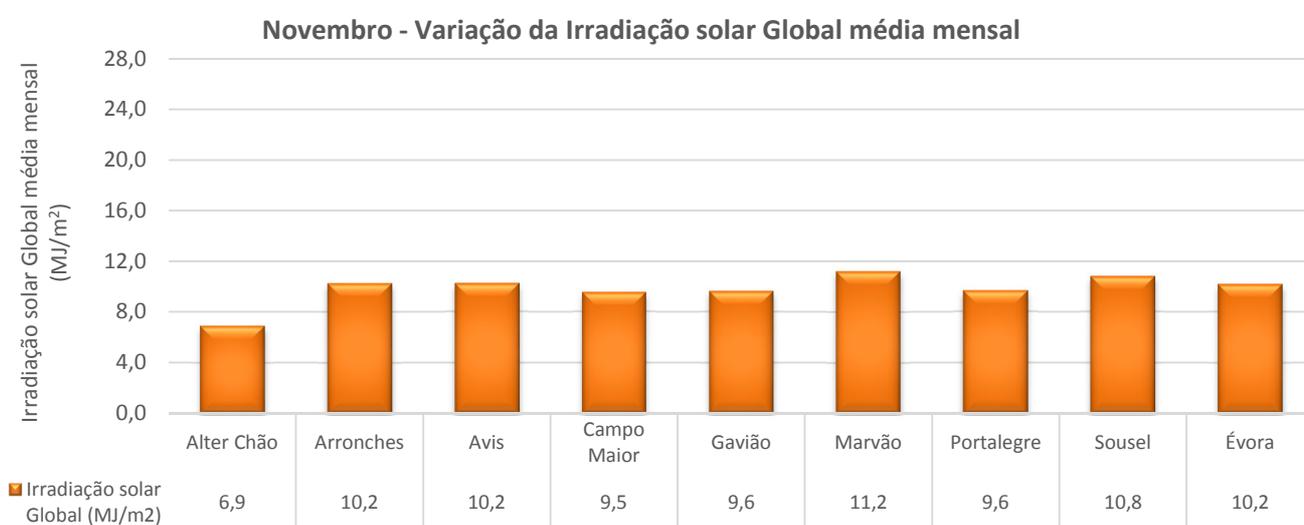


Figura 57 – Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global para Novembro e comparação com Évora.

### 3.4.5 Dezembro

Para o mês de Dezembro apenas existem dados completos para as estações meteorológicas de Avis, Campo Maior e Sousel, uma vez que nos restantes Municípios verificam-se períodos para os quais não existem dados devido a falta de bateria no sistema de aquisição de dados, perda de contacto entre o piranómetro e o sistema de aquisição de dados e devido à não recolha dos dados a tempo.

No gráfico da Figura 58 observa-se a variação mensal da Radiação solar Global média diária em Dezembro, em que de uma forma geral os Municípios do Alto Alentejo apresentam um comportamento semelhante ao longo do mês com diversos picos positivos e negativos consoante as diferentes condições meteorológicas que ocorreram ao longo do período em análise. Comportamento esse que corresponde ao registado no ponto de referência – Évora.

Por outro lado verifica-se um decréscimo na Radiação solar Global média diária relativamente ao mês anterior (Novembro), Durante o mês de Dezembro os valores da Radiação solar oscilaram entre os 20 W/m<sup>2</sup> e os 350 W/m<sup>2</sup>.

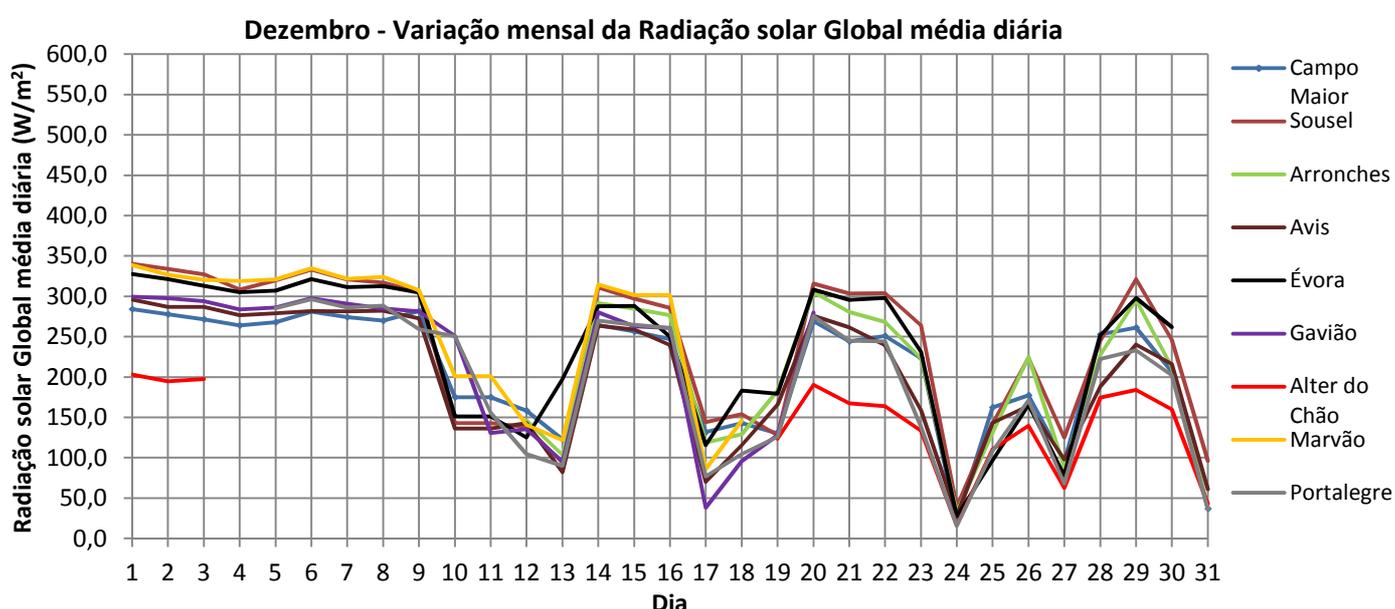


Figura 58 – Gráfico com a variação mensal da Radiação solar Global média diária para o mês de Dezembro e comparação com os dados de Évora.

No gráfico da Figura 59 ilustra-se a variação mensal em termos energéticos da Irradiação solar Global diária para cada um dos Municípios analisados. Através da análise do gráfico verifica-se uma diminuição da Irradiação solar diária ao longo do mês, cujo comportamento é bastante irregular ao longo do mês de Dezembro, apresentando diversos picos negativos e positivos, sendo que em termos globais os Municípios apresentam um comportamento bastante semelhante entre si.

Em termos comparativos com Évora verifica-se uma variação mensal semelhante à registada nos Municípios do Alto Alentejo, com valores da mesma ordem de grandeza.

No início do mês o valor de Irradiação solar Global média diária é da ordem dos 11 MJ/m<sup>2</sup> enquanto no final de Dezembro os valores registados são da ordem dos 2 MJ/m<sup>2</sup>, podendo-se concluir que ocorreu uma diminuição abrupta da quantidade de energia incidente nos Municípios do Alto Alentejo e em Évora relativamente ao início do mês, sendo esse facto justificado com o agravamento das condições meteorológicas.

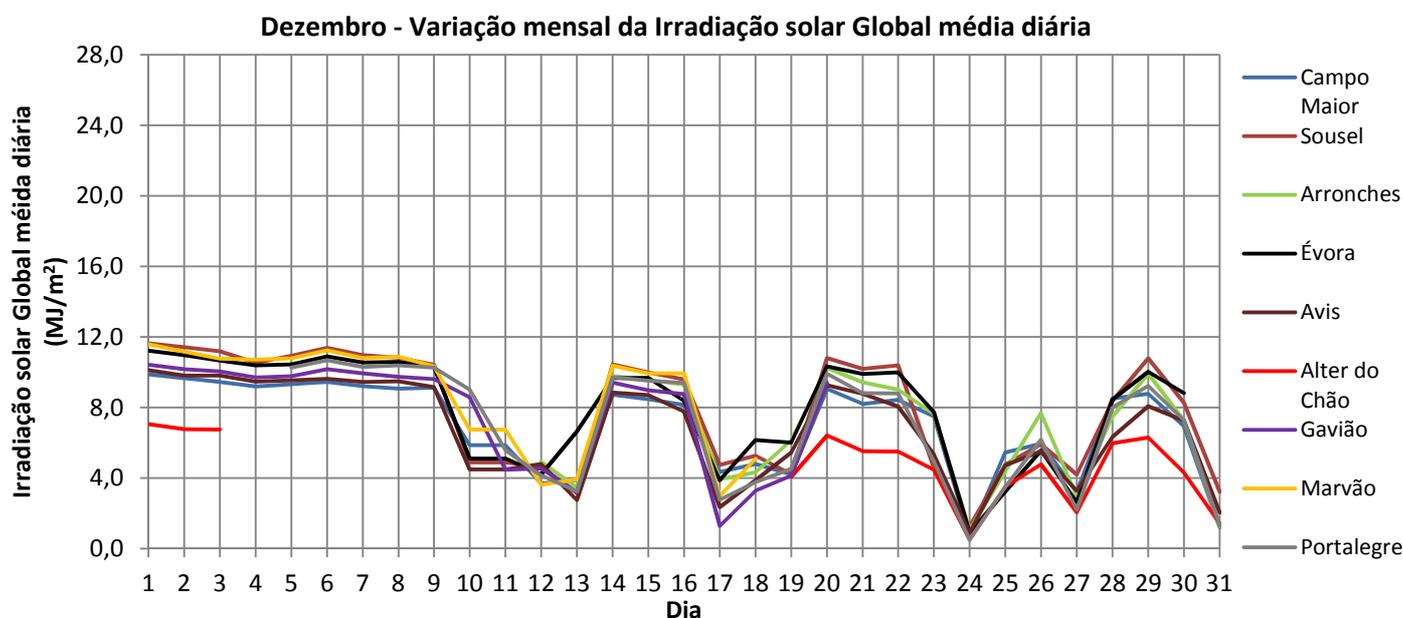


Figura 59 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Global média diária para o mês de Dezembro e comparação com os dados de Évora.

Como síntese mensal ilustra-se de seguida na Figura 60 e Figura 61 os gráficos com as médias mensais da Radiação solar Global e da Irradiação solar Global para o mês de Dezembro nos vários Municípios do Alto Alentejo e em Évora.

A análise do gráfico da Figura 60 permite concluir que o Município de Marvão, em termos médios, apresenta uma incidência de Radiação solar Global diária (262,6 W/m<sup>2</sup>) superior aos restantes Municípios e também em relação ao ponto de referência (Évora – 235,5 W/m<sup>2</sup>), tal como se verificou no mês anterior. Por outro lado Portalegre é o Município que apresenta uma menor incidência de Radiação solar Global diária – 188,1 W/m<sup>2</sup> (exceto Alter do Chão) contudo estes valores têm baixo valor estatístico uma vez que vários Municípios não apresentam valores de Radiação solar para todos os dias do mês.

Contudo a média mensal da Radiação solar Global no Alto Alentejo em Dezembro foi de 218,1 W/m<sup>2</sup> (exceto Alter do Chão), ligeiramente inferior à média mensal de Évora - 235,5 W/m<sup>2</sup>.

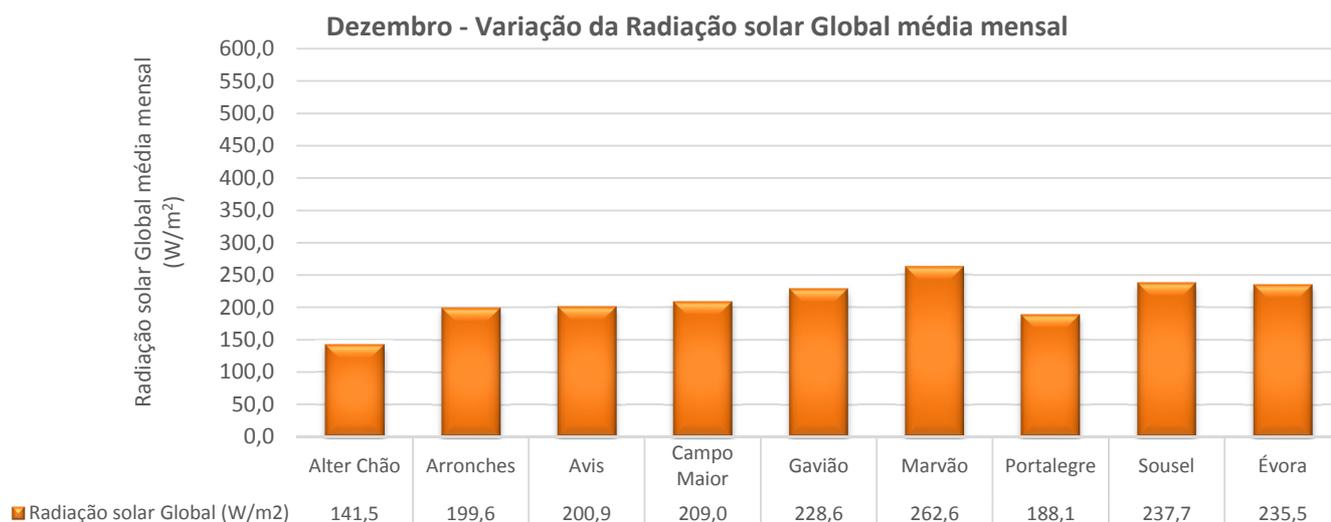


Figura 60 – Gráfico com a média mensal da Radiação solar Global para Dezembro e comparação com Évora.

A nível energético (Figura 61) é também no Município de Marvão que se verifica em termos médios diários uma maior quantidade de energia incidente ( $8,8 \text{ MJ/m}^2$ ), com uma diferença de  $2,1 \text{ MJ/m}^2$  em relação ao valor mais baixo – Arronches ( $6,7 \text{ MJ/m}^2$ ).

Em termos comparativos e de uma forma geral os Municípios do Alto Alentejo registaram valores ligeiramente inferiores aos registados na cidade de Évora com exceção para o Município de Marvão.

A média mensal dos Municípios para o mês de Dezembro foi de  $7,4 \text{ MJ/m}^2$ , ou seja relativamente ao mês passado (Novembro –  $10,2 \text{ MJ/m}^2$ ) verifica-se uma diminuição na Irradiação solar Global de  $2,8 \text{ MJ/m}^2$ .

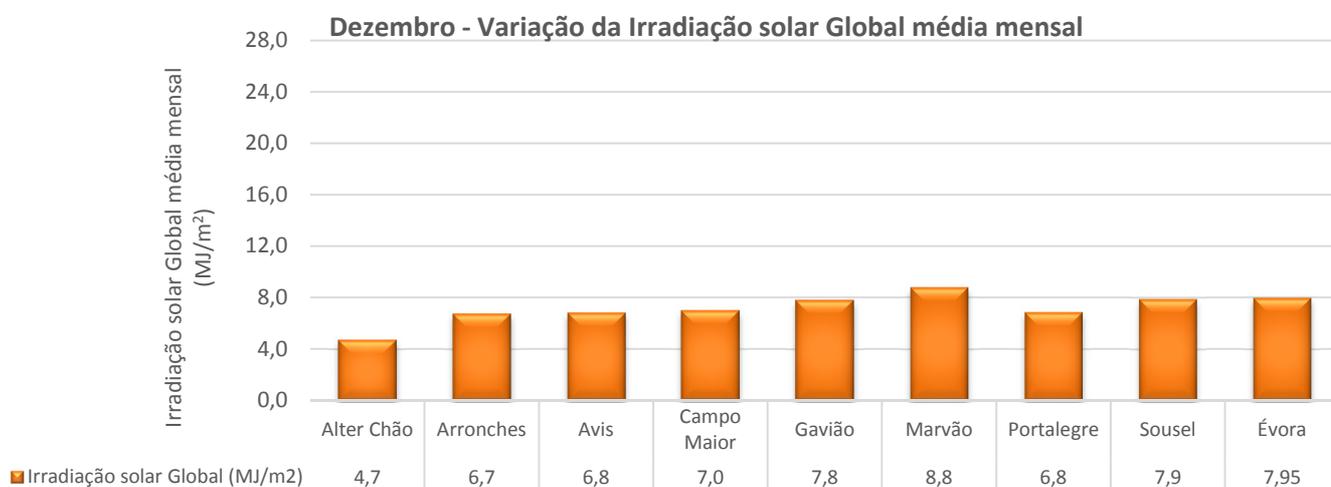


Figura 61 – Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global para Dezembro e comparação com Évora.

### 3.4.6 Análise semestral

O presente subcapítulo consiste na análise semestral da Radiação solar Global que corresponde ao período compreendido entre Agosto e Dezembro de 2013. Para esse fim foi determinada a média semestral da Radiação solar Global ( $\bar{I}_{h\text{-semestral}}$ ) e da Irradiação solar Global ( $\bar{H}_{h\text{-semestral}}$ ) para cada Município do Alto Alentejo e para Évora através das seguintes equações:

$$\bar{I}_{h\text{-semestral}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{mês}}} \bar{I}_{h\text{-mensal}}}{n_{\text{mês}}} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad 3.6$$

$$\bar{H}_{h\text{-semestral}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{mês}}} \bar{H}_{h\text{-mensal}}}{n_{\text{mês}}} \quad [\text{MJ}/\text{m}^2] \quad 3.7$$

Em que  $n_{\text{mês}}$  corresponde ao número de meses para o qual é efetuada a análise.

Na Figura 62 e Figura 63 são visíveis os resultados obtidos a partir das equações 3.6 e 3.7 para os Municípios do Alto Alentejo e para Évora. Os Municípios de Portalegre e Marvão não estão representados nos gráficos uma vez que apenas existem dados para estes dois Municípios desde Novembro, pelo que não é uma análise semestral mas sim de apenas dois meses e portanto apresentam pouco significado e baixo valor estatístico.

Através da análise da Figura 62 pode-se concluir que de uma forma geral os Municípios do Alto Alentejo apresentam uma média semestral de Radiação solar Global ligeiramente inferior à registada em Évora em igual período. O Município de Sousel de entre os vários do Alto Alentejo é o que apresenta uma maior média semestral situada nos 364,81 W/m<sup>2</sup>.

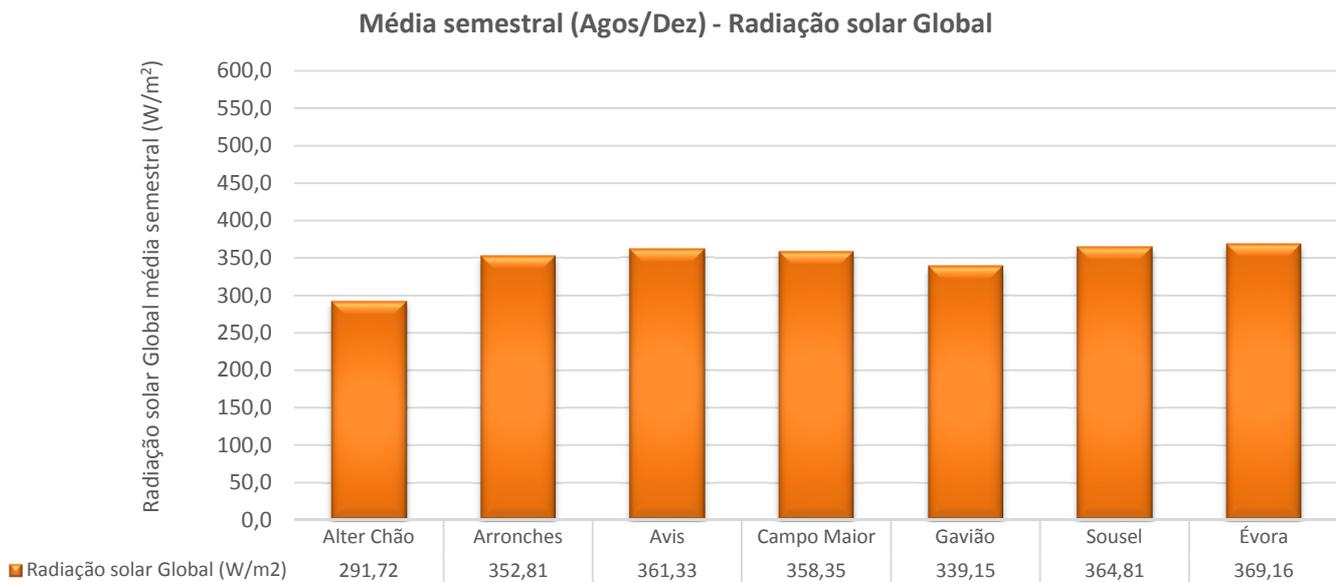


Figura 62 – Gráfico com a média semestral da Radiação solar Global para o Alto Alentejo e Évora.

O mesmo se verifica em termos energéticos (Figura 63), ou seja Évora (15,54 MJ/m<sup>2</sup>) registou no período de Agosto a Dezembro uma Irradiação solar Global ligeiramente superior à registada nos Municípios do Alto Alentejo. Por outro lado a média semestral de Irradiação solar Global mais alta registou-se na estação de Sousel (15,31 MJ/m<sup>2</sup>).

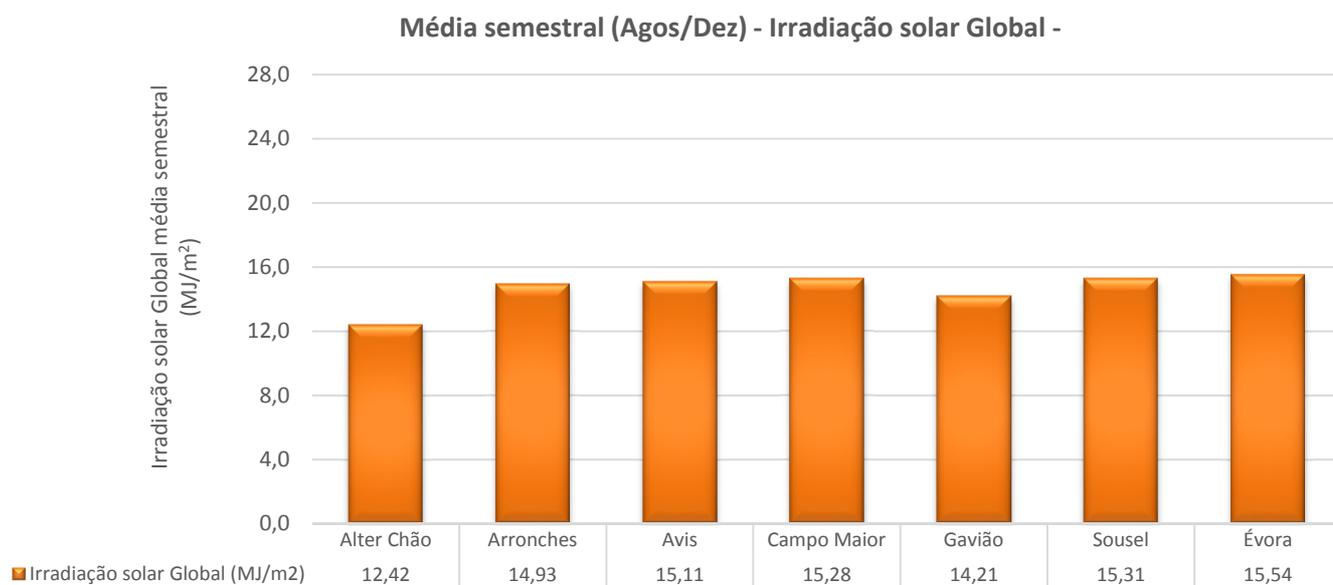


Figura 63 – Gráfico com a média semestral da Irradiação solar Global para o Alto Alentejo e Évora.

Para a elaboração dos mapas semestrais foram utilizados os resultados anteriores, bem como a cartografia do Alto Alentejo cedida gentilmente pela CIMAA em formato 'DWG' tendo sido utilizado o *Software 'Autocad'* como auxiliar. Para além disso defini um esquema de cores por classes, de acordo com o nível de Radiação ou Irradiação solar Global.

No mapa da Figura 64 é possível verificar que os Municípios de Arronches, Avis, Campo Maior e Sousel apresentam a uma média semestral de Radiação solar Global entre 350 a 400 W/m<sup>2</sup>. A média trimestral para o Município de Gavião está na classe dos 300 a 350 W/m<sup>2</sup>.

O Município de Alter do Chão não se ilustra nos mapas uma vez que as medições não foram efetuadas nas mesmas condições devido à incorreta instalação da estação meteorológica.

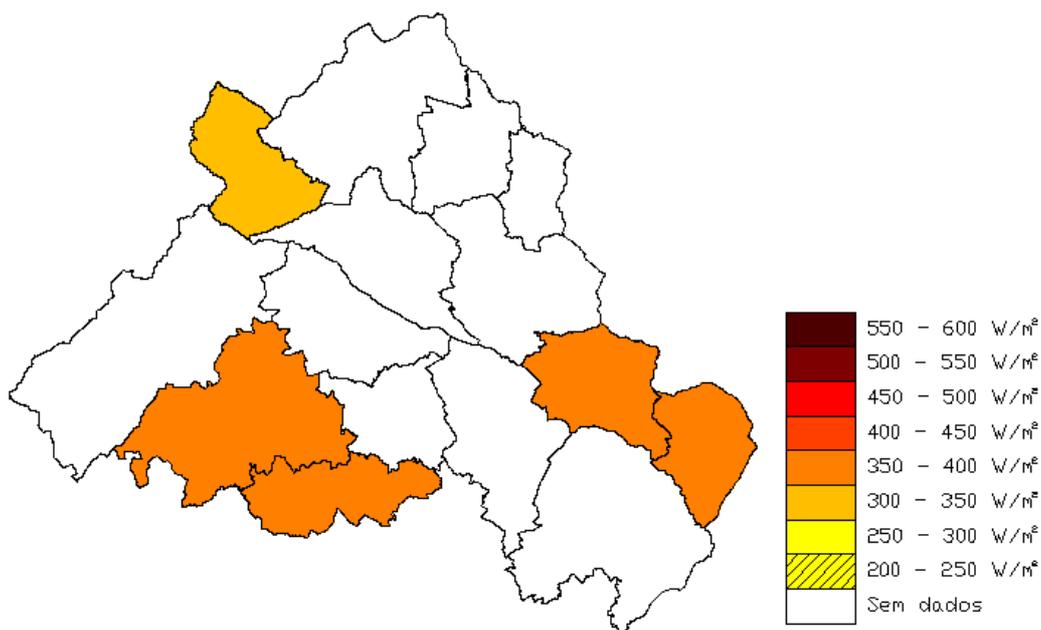


Figura 64 – Mapa com a média semestral da Radiação solar Global para o Alto Alentejo.

A Figura 65 ilustra o mapa semestral da Irradiação solar Global no Alto Alentejo. Através da análise do mesmo é possível verificar que os Municípios de Arronches, Avis, Campo Maior, Gavião e Sousel apresentam uma média semestral de Irradiação solar Global na ordem dos 14 a 16 MJ/m<sup>2</sup>.

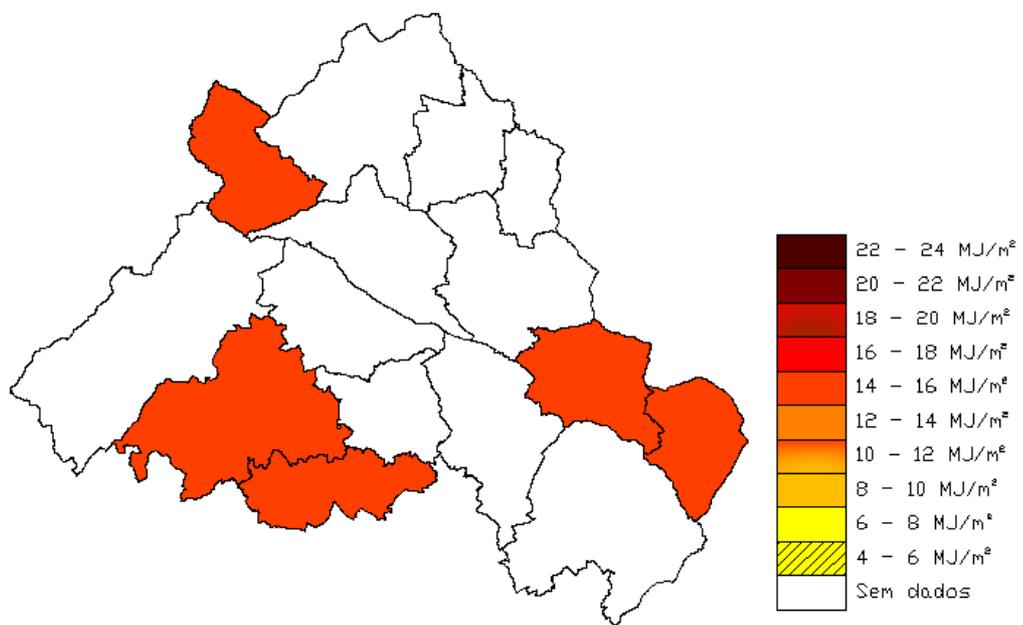


Figura 65 – Mapa com a média semestral da Irradiação solar Global para o Alto Alentejo.

### 3.5 Estudo das correlações da Radiação solar Difusa

#### 3.5.1 Metodologia utilizada para o estudo

De entre as várias estações meteorológicas instaladas apenas a estação central de Portalegre está habilitada com a devida instrumentação para efetuar a medida da Radiação solar Difusa. De forma a obter a componente Difusa para os restantes Municípios do Alto Alentejo foi efetuado o estudo de diversas correlações desenvolvidas ao longo de várias décadas por especialistas na área da Radiação solar tendo por base os dados obtidos na estação central de Portalegre.

As várias correlações desenvolvidas permitem obter a variação horária, diária, ou média mensal da Radiação solar Difusa de acordo com a base de dado disponível. De acordo com [21] as correlações podem-se agrupar em quatro grupos, ou seja correlações a partir da:

- Grupo A - Fração da Radiação solar Difusa ( $K_d$ ) em função do índice de transparência ( $K_T$ ):

$$\left( K_d = \frac{\overline{H_d}}{\overline{H_h}} \right) \approx f \left( K_T = \frac{\overline{H_h}}{\overline{H_o}} \right)$$

- Grupo B - Fração da Radiação solar Difusa ( $K_d$ ) em função da Fração relativa da duração do sol  $\left(\frac{S}{S_o}\right)$ :

$$\left( K_d = \frac{\overline{H_d}}{\overline{H_h}} \right) \approx f \left( \frac{S}{S_o} \right)$$

- Grupo C - Coeficiente de Radiação solar Difusa ( $K_{dd}$ ) em função do índice de transparência ( $K_T$ ):

$$\left( K_{dd} = \frac{\overline{H_d}}{\overline{H_o}} \right) \approx f \left( K_T = \frac{\overline{H_h}}{\overline{H_o}} \right)$$

- Grupo D - Coeficiente de Radiação solar Difusa ( $K_{dd}$ ) em função da Fração relativa da duração do sol ( $\frac{S}{S_0}$ ):

$$\left( K_{dd} = \frac{\overline{H_d}}{H_0} \right) \approx f \left( \frac{S}{S_0} \right)$$

Para o presente estudo foram utilizadas correlações do Grupo A de forma a obter a variação da Radiação solar Difusa diária ( $\overline{H_d}$ ). Para isso partiu-se dos dados de Irradiação solar Global e Difusa obtidos na estação de Portalegre, durante o período de 1 de Novembro de 2013 até 9 de Janeiro de 2014, os quais se ilustram na Figura 66. No dia 22 de Novembro detetei uma avaria na estação central de Portalegre, nomeadamente no *Solys 2*, ou seja no sistema de seguimento “aparente” do sol, no qual estão incorporados os sensores responsáveis pela medição da Radiação solar.

O *Solys 2* faz o seguimento do sol a dois eixos, ou seja ao nível da altura do sol (ângulo da altitude solar –  $\gamma$ ) e ao nível do azimute ( ângulo solar azimutal –  $\alpha$ ). A avaria ocorreu ao nível do azimute e no dia 4 de Dezembro desloquei-me a Portalegre e resolvi a avaria.

O período de dados utilizado é bastante reduzido porque foi o único período para o qual foi possível obter dados em simultâneo de Radiação solar Global e Difusa, sendo que o estudo realizado apresenta um significado estatístico bastante reduzido.

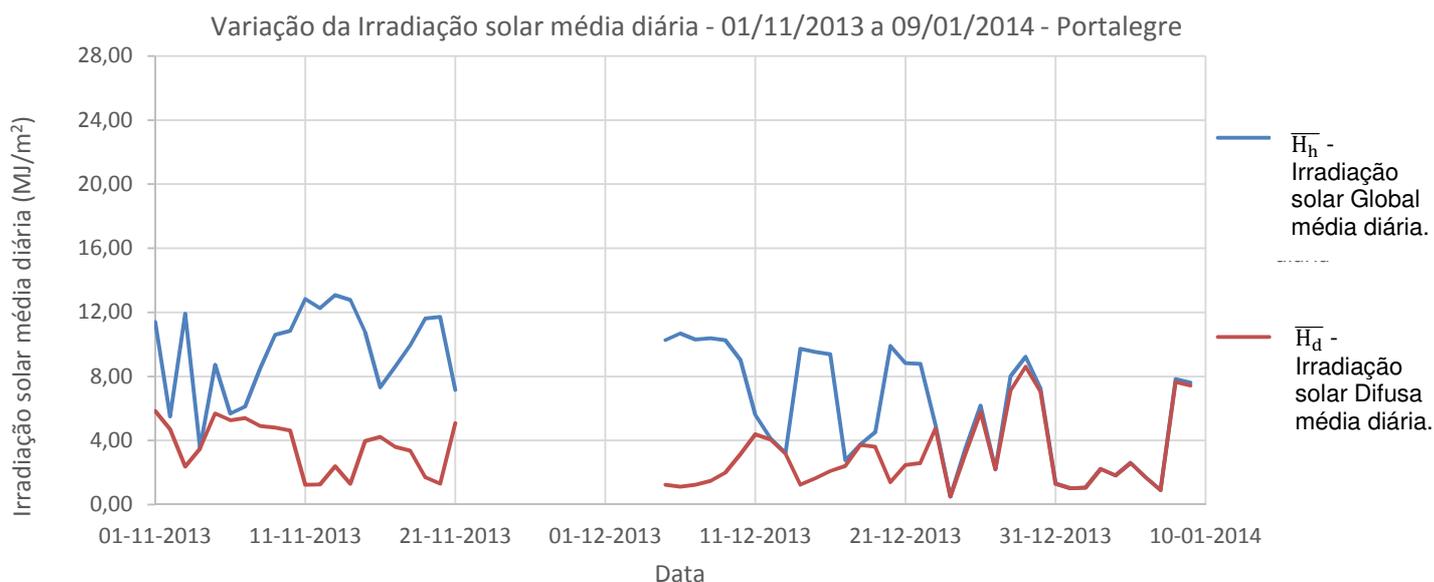


Figura 66 – Gráfico com a variação da Irradiação solar média diária em Portalegre – 01/11/2013 a 09/01/2014  
Dados utilizados para o estudo das correlações.

Numa fase inicial do estudo procedeu-se ao cálculo de diversos parâmetros para a estação central de Portalegre, nomeadamente o valor diário de  $K_T$  e o valor diário da Fração da Radiação solar Difusa ( $K_d$ ) para o período referido anteriormente.

Para calcular o valor de  $K_T$  foi utilizado o método de cálculo que se ilustra pela seguinte ordem:

- i. Cálculo da Declinação solar ( $\delta$ ) através da equação 2.1;
- ii. Cálculo de  $w_s$  através da equação 2.8, utilizando os resultados da  $\delta$ ;
- iii. Cálculo de  $H_o$  através da equação 2.13, utilizando os resultados da  $\delta$  e de  $w_s$ ;
- iv. Cálculo de  $S_o$  através da equação 2.9, utilizando os resultados de  $w_s$ ;
- v. Cálculo de  $\overline{H_h}$  através da equação 2.16, utilizando os resultados de  $S_o$  e os valores de  $\overline{I_h}$ ;
- vi. Por fim cálculo do  $K_T$  através da equação 2.15, utilizando os resultado de  $H_o$  e  $\overline{H_h}$ .

O valor diário da Fração da Radiação solar Difusa ( $K_d$ ) de acordo com [21] é dado por:

$$K_d = \frac{\overline{H_d}}{\overline{H_h}} \quad 3.8$$

Em que  $\overline{H_d}$  é o valor médio diário da Irradiação solar Difusa expresso em MJ/m<sup>2</sup>, que pode ser obtido através da seguinte equação:

$$\overline{H_d} = \overline{I_d} \times S_o \times \frac{3,6}{1000} \text{ [MJ/m}^2\text{]} \quad 3.9$$

Em que  $\overline{I_d}$  é a Radiação solar Difusa média diária expressa em W/m<sup>2</sup>, que pode ser obtida a partir da seguinte equação:

$$\overline{I_d} = \frac{\sum_{w_{s-}}^{w_{s+}} I_d}{N_{sol}} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad 3.10$$

Em que  $w_{s-}$  e  $w_{s+}$  corresponde ao nascer e por-do-sol, respetivamente. Por outro lado  $N_{sol}$  representa o número total de valores registados ao longo do dia solar.

Os resultados obtidos para  $K_T$  e  $K_d$  para o período referido encontram-se no Quadro 4.

Quadro 4 - Resultados obtidos para  $K_T$  e  $K_d$  em Portalegre durante o período compreendido entre o dia 1/11/2013 até 09/01/2014.

Dia	Novembro		Dezembro		Janeiro	
	$K_T$	$K_d$	$K_T$	$K_d$	$K_T$	$K_d$
1	0,577	0,513			0,071	0,995
2	0,282	0,855			0,074	0,995
3	0,617	0,198			0,154	0,995
4	0,184	0,992			0,125	0,995
5	0,461	0,652	0,703	0,121	0,179	0,995
6	0,303	0,927	0,734	0,104	0,117	0,995
7	0,331	0,883	0,712	0,120	0,061	0,995
8	0,465	0,576	0,722	0,142	0,527	0,980
9	0,585	0,453	0,716	0,193	0,509	0,978
10	0,604	0,427	0,632	0,348		
11	0,722	0,096	0,393	0,784		
12	0,696	0,103	0,292	0,983		
13	0,750	0,183	0,229	0,978		
14	0,741	0,102	0,689	0,127		
15	0,631	0,368	0,677	0,172		
16	0,433	0,576	0,669	0,223		
17	0,512	0,420	0,198	0,873		
18	0,599	0,338	0,269	0,990		
19	0,707	0,145	0,324	0,797		
20	0,719	0,111	0,709	0,140		
21	0,443	0,709	0,632	0,281		
22			0,629	0,294		
23			0,356	0,954		
24			0,036	0,995		
25			0,250	0,911		
26			0,440	0,932		
27			0,157	0,995		
28			0,568	0,890		
29			0,654	0,933		
30			0,514	0,968		
31			0,092	0,995		

De seguida efetuou-se a filtragem dos dados utilizados, ou seja, os dias cujos valores de  $K_d$  são superiores a 0,900 foram excluídos da análise, uma vez que  $K_d > 0,900$  significa que o dia em questão esteve bastante encoberto e portanto a Radiação solar para esse dia foi praticamente toda Difusa pelo que esse valor de  $K_d$  não apresenta significado quando é elaborado um gráfico de  $K_d$  em função de  $K_T$ .

Para este estudo partiu-se de uma amostra de 57 dias e após a filtragem a amostra ficou reduzida a 34 dias, sendo que os dias que foram excluído da análise estão assinalados a verde no Quadro 4.

Concluída a filtragem e recorrendo às ferramentas numéricas do *Software Microsoft Excel* procedeu-se à elaboração dos dois gráficos que se ilustram (Figura 67 e Figura 68) com  $K_d$  em função de  $K_T$  com o objetivo de obter duas correlações que permitam determinar o valor de  $\overline{H_d}$  a partir do valor de  $K_T$  para cada estação meteorológica instalada no Alto Alentejo.

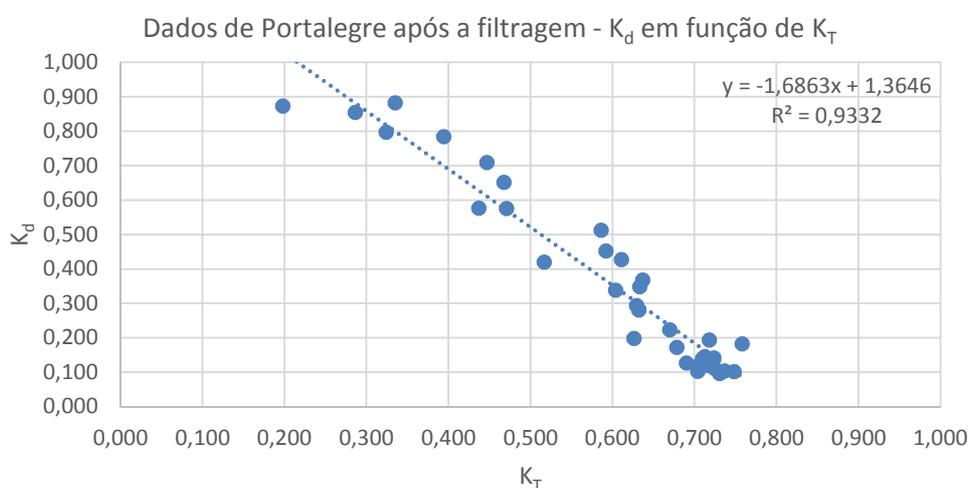


Figura 67 - Gráfico com a variação de  $K_d$  em função  $K_T$  – Dados de Portalegre após a filtragem; Correlação de 1º grau.

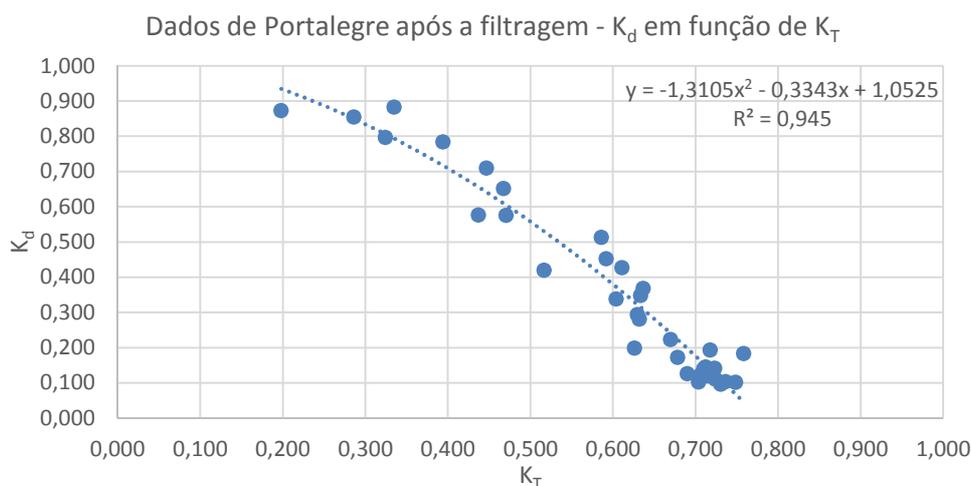


Figura 68 - Gráfico com a variação de  $K_d$  em função  $K_T$  – Dados de Portalegre após a filtragem; Correlação de 2º grau.

Como se pode observar na Figura 67 e Figura 68 as correlações são dadas pelas seguintes equações, respetivamente:

$$K_d = 1,3646 - 1,6863(K_T) \quad R^2 = 0,9332 \quad 3.11$$

$$K_d = 1,0525 - 0,3343(K_T) - 1,3105(K_T^2) \quad R^2 = 0,9450 \quad 3.12$$

Em que  $R^2$  (equação 3.24) é o coeficiente de determinação que é utilizado para determinar a relação linear entre os valores calculados e os valores medidos [21]. Mais à frente será listada a equação que permite determinar  $R^2$ .

Como a amostra de dados utilizados para o presente estudo é bastante reduzida e portanto apresenta um baixo significado estatístico e tendo em conta que um estudo desta natureza deverá ter uma amostra mínima de dados compreendidos entre um e dois anos de medições contínuas de Radiação solar, efetuou-se o estudo de várias correlações que foram desenvolvidas tendo por base uma amostra de dados relativamente grande. As quatro correlações utilizadas para o presente estudo foram as seguintes:

- 1 - (Stanhill, 1966) - [22]:

$$K_d = 1,539 - 1,755 (K_T) \quad 3.13$$

- 2 - (Ruth & Chant, 1976) [23]:

$$K_d = \begin{cases} 0,98 & \text{para } K_T \leq 0,1 \\ 0,910 + 1,154(K_T) - 4,936(K_T)^2 + 2,848(K_T)^3 & \text{para } 0,1 \leq K_T \leq 0,7 \end{cases} \quad 3.14$$

- 3 - (Collares Pereira & A. Rabl, 1979) [24]:

$$K_d = \begin{cases} 0,99 & \text{para } K_T \leq 0,17 \\ 1,188 - 2,272(K_T) + 9,473(K_T)^2 - 21,865(K_T)^3 + 14,648(K_T)^4 & \text{para } 0,17 < K_T < 0,75 \\ 0,632 - 0,54(K_T) & \text{para } 0,75 < K_T < 0,80 \\ 0,2 & \text{para } K_T \geq 0,80 \end{cases} \quad 3.15$$

- 4 - (Erbs *et al*, 1982) [25]:

$$K_d = \begin{cases} 1,0 - 0,2727(K_T) + 2,4495(K_T)^2 - 11,9514(K_T)^3 + 9,3879(K_T)^4 & \text{para } w_s < 1,4208 \text{ e } K_T < 0,715 \\ 0,143 & \text{para } K_T \geq 0,715 \\ 1,0 - 0,2832(K_T) + 2,5557(K_T)^2 - 0,8448(K_T)^3 & \text{para } w_s \geq 1,4208 \text{ e } K_T < 0,722 \\ 0,175 & \text{para } K_T \geq 0,722 \end{cases} \quad 3.16$$

### 3.5.2 Análise das correlações e resultados

Com o objetivo de avaliar qual das correlações listadas anteriormente melhor se adequa à amostra de dados disponível e que permita efetuar a extrapolação da Radiação solar Difusa para os Municípios do Alto Alentejo com o menor erro associado possível, procedeu-se à determinação de diversos parâmetros estatísticos que são obtidos a partir das seguintes equações:

- Erro relativo em percentagem (E) [21]:

$$E = \left( \frac{c_i - m_i}{m_i} \right) \times 100 \quad 3.17$$

Em que  $c_i$  é o valor calculado de  $K_d$  ou  $K_{dd}$  a partir da correlação, e  $m_i$  é o valor calculado de  $K_d$  ou  $K_{dd}$  a partir dos dados medidos. O resultado de E indica o desvio entre o valor calculado e o valor medido em percentagem, logo o valor ideal de E deverá ser igual a zero.

- Erro médio em percentagem (MPE) [21]:

$$MPE = \frac{\sum_{i=1}^{n_{amostra}} E}{n_{amostra}} \quad 3.18$$

Onde  $n_{amostra}$  é o número total de valores que a amostra contém. O MPE é definido como sendo a média de E para cada correlação.

- Valor absoluto do erro médio em percentagem (MAPE) [21]:

$$MAPE = ABS \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_{amostra}} E}{n_{amostra}} \right) \quad 3.19$$

O MAPE é definido como sendo o valor médio absoluto do desvio entre os valores de  $K_d$  ou  $K_{dd}$  estimados a partir das correlações e os valores calculados a partir das medições.

- Soma dos quadrados do erro relativo (SSRE) [21]:

$$SSRE = \sum_{i=1}^{n_{amostra}} \left( \frac{c_i - m_i}{m_i} \right)^2 \quad 3.20$$

O valor ideal de SSRE deverá ser igual a zero.

- Erro padrão relativo (RSE) [21]:

$$RSE = \sqrt{\frac{SSRE}{n_{amostra}}} \quad 3.21$$

O valor de RSE indica o grau de precisão dos valores obtidos a partir das correlações.

- Tendência do erro médio (MBE) [21]:

$$MBE = \frac{1}{n_{amostra}} \sum_{i=1}^{n_{amostra}} (c_i - m_i) \quad 3.22$$

O MBE fornece informação relativamente ao desempenho da correlação a longo prazo, permitindo a comparação do desvio real entre os valores calculados e medidos. O valor ideal do MBE é zero.

- Raiz quadrada do erro médio (RSME) [21]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_{amostra}} \sum_{i=1}^{n_{amostra}} (c_i - m_i)^2} \quad 3.23$$

O RMSE fornece informações sobre o desempenho da correlação a curto prazo. O valor de RSME é sempre positivo, sendo zero o seu valor ideal.

➤ Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) [21]:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_{amostra}} (c_i - c_a) \times (m_i - m_a)}{\sqrt{[\sum_{i=1}^{n_{amostra}} (c_i - c_a)^2] \times [\sum_{i=1}^{n_{amostra}} (m_i - m_a)^2]}} \quad 3.24$$

Onde  $c_a$  e  $m_a$  são a média dos valores de  $K_d$  ou  $K_{dd}$  calculados a partir da correlação e a média dos valores de  $K_d$  ou  $K_{dd}$  calculados a partir dos valores medidos, respetivamente. O valor de  $R^2$  é utilizado para determinar a relação linear entre os valores calculados e os valores medidos, sendo que o valor ideal é um (1).

Os resultados obtidos para os parâmetros estatísticos enunciados anteriormente encontram-se no Quadro 5. Através da análise dos resultados obtidos foi possível chegar à conclusão que as quatro correlações estudadas apresentam bons resultados e bastante idênticos.

Quadro 5 – Resultado dos parâmetros estatísticos para cada correlação.

	<b>Stanhill, 1966</b>	<b>Ruth &amp; Chant, 1976</b>	<b>Collares Pereira &amp; A. Rabl, 1979</b>	<b>Erbs et al., 1982</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9495	0,9481	0,9458	0,9496
<b>MPE</b>	66,08	49,39	44,76	8,47
<b>MAPE</b>	66,08	49,39	44,76	8,47
<b>SSRE</b>	26,15	16,93	14,90	2,02
<b>RSE</b>	0,88	0,71	0,66	0,24
<b>MBE</b>	0,13	0,08	0,07	0,01
<b>RMSE</b>	0,14	0,10	0,09	0,06

Utilizando as quatro correlações selecionadas para o estudo efetuado (equações 3.13 a 3.16) e as correlações obtidas através dos dados medidos (3.11 e 3.12) procedeu-se ao cálculo dos valores de  $\overline{H}_d$  para o período correspondente à amostra. Rearranjando a equação 3.8 o valor de  $\overline{H}_d$  pode ser obtido através da seguinte equação:

$$\overline{H}_d = K_d \times \overline{H}_h \quad [M]/m^2 \quad 3.25$$



### 3.6 Análise da Radiação solar Difusa

Na presente secção é efetuada a análise da Radiação solar Difusa obtida por extrapolação através da equação 3.15 e respetiva comparação com a Radiação solar Global medida em igual período. Os gráficos que se ilustram de seguida apenas apresentam dados para os dias em que foi possível obter dados de Radiação solar Global e dizem respeito às estações meteorológicas instaladas nos Municípios do Alto Alentejo para o período compreendido entre Agosto e Dezembro de 2013 inclusive. Para cada mês são apresentados os seguintes tipos de gráficos:

- Variação mensal da Irradiação solar Difusa média diária;
- Média mensal da Irradiação solar Global e Difusa.

#### 3.6.1 Agosto

O gráfico que se segue (Figura 70) ilustra os dados da Irradiação solar Difusa média diária obtidos a partir da extrapolação efetuada utilizando a equação 3.15. Através da análise da Figura 70 pode-se verificar que a Irradiação solar Difusa é semelhante nos Municípios em análise e apresenta variações entre os 6 MJ/m<sup>2</sup> e os 10 MJ/m<sup>2</sup> durante o mês de Agosto.

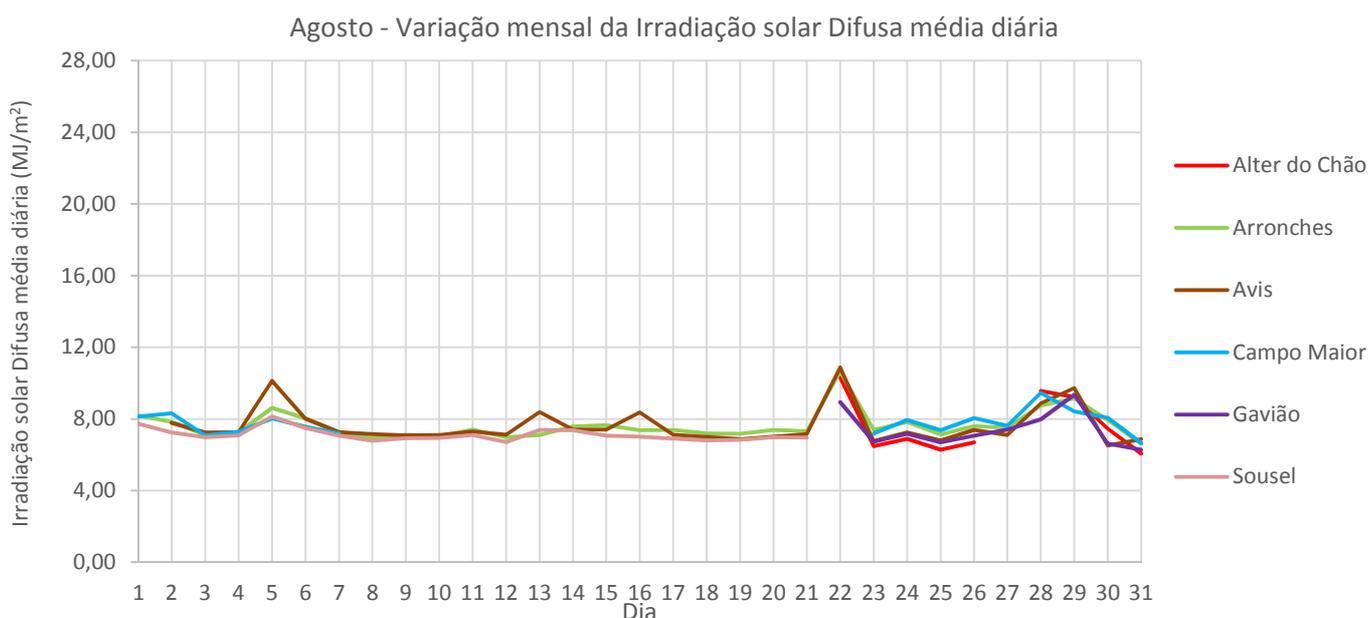


Figura 70 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Difusa média diária para o mês de Agosto.

Como síntese mensal e comparação entre as duas componentes da Radiação solar, ilustra-se de seguida na Figura 71 o gráfico com a média mensal da Irradiação solar Difusa ( $\bar{H}_{d\text{-mensal}}$ ) e com a média mensal da Irradiação solar Global ( $\bar{H}_{h\text{-mensal}}$ ) para o mês de Agosto nos vários Municípios do Alto Alentejo em estudo. Os valores médios mensais foram obtidos a partir da seguinte equação:

$$\bar{H}_{d\text{-mensal}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{dia}}} \bar{H}_d}{n_{\text{dia}}} \quad [\text{MJ}/\text{m}^2] \quad 3.26$$

Em que  $n_{\text{dia}}$  é o número total de dias do mês.

Dos dados apresentados na Figura 71 apenas é plausível retirar conclusões para os Municípios de Arronches e Avis porque são os únicos Municípios para os quais foi possível obter dados ao longo de todo o mês. Contudo em termos médios a Irradiação solar Difusa oscilou entre os 7 MJ/m<sup>2</sup> e os 8 MJ/m<sup>2</sup> durante o mês de Agosto.

Através da análise da Figura 71 é possível constatar que a Irradiação solar Difusa em termos globais representou cerca de 29,5% da Irradiação solar Global registada nos Municípios do Alto Alentejo durante Agosto.

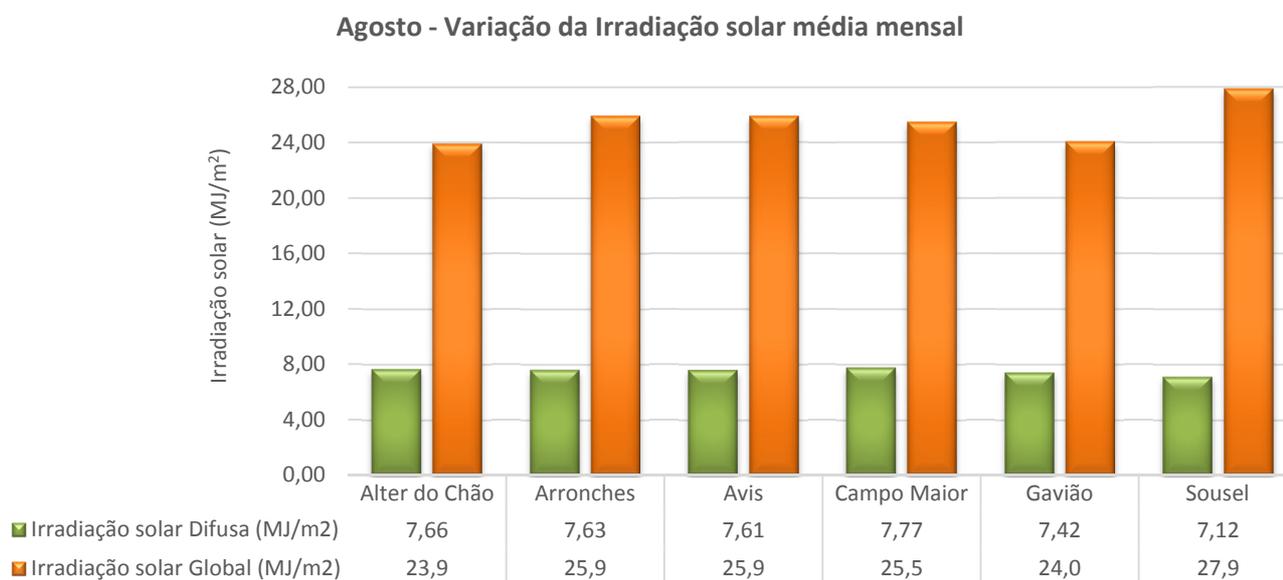


Figura 71 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global e Difusa para Agosto.

### 3.6.2 Setembro

A Figura 72 ilustra a variação mensal da Irradiação solar Difusa ao longo do mês de Setembro. Em termos globais a Irradiação solar Difusa média diária oscilou entre os 2 MJ/m<sup>2</sup> e os 10 MJ/m<sup>2</sup>, sendo que o Município de Alter do Chão apresenta uma maior Irradiação solar Difusa ao longo do mês devido à incorreta instalação da estação meteorológica que origina fenómenos de obstrução e reflexão dos raios solares contribuindo para o aumento da componente Difusa.

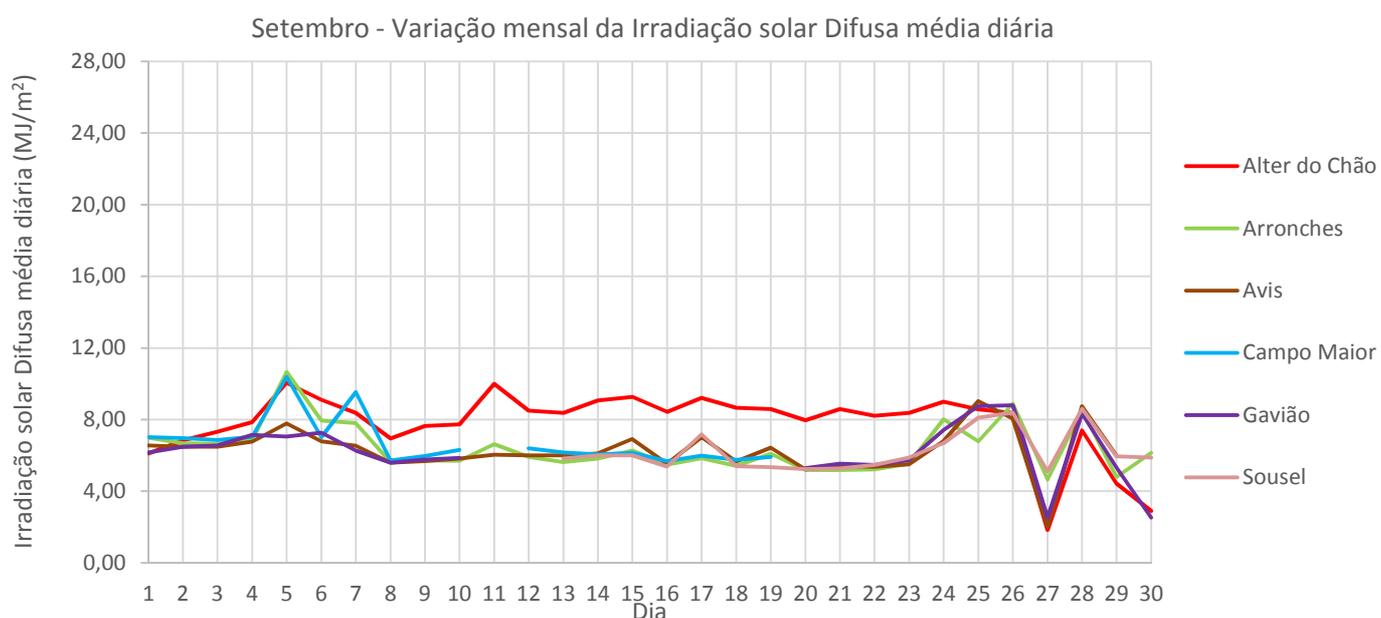


Figura 72 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Difusa média diária para o mês de Setembro.

Na Figura 73 pode-se observar a variação da Irradiação solar durante o mês de Setembro, através da qual se pode concluir que a componente Difusa da Radiação solar em termos médios mensais oscilou entre os 6 MJ/m<sup>2</sup> e os 7 MJ/m<sup>2</sup> nos Municípios em análise, exceto em Alter do Chão devido à incorreta instalação da estação.

Relativamente ao mês anterior (Agosto) verifica-se uma diminuição global da Radiação solar devido às condições climáticas, sendo que a componente difusa representou em Setembro cerca de 35% da Radiação total.

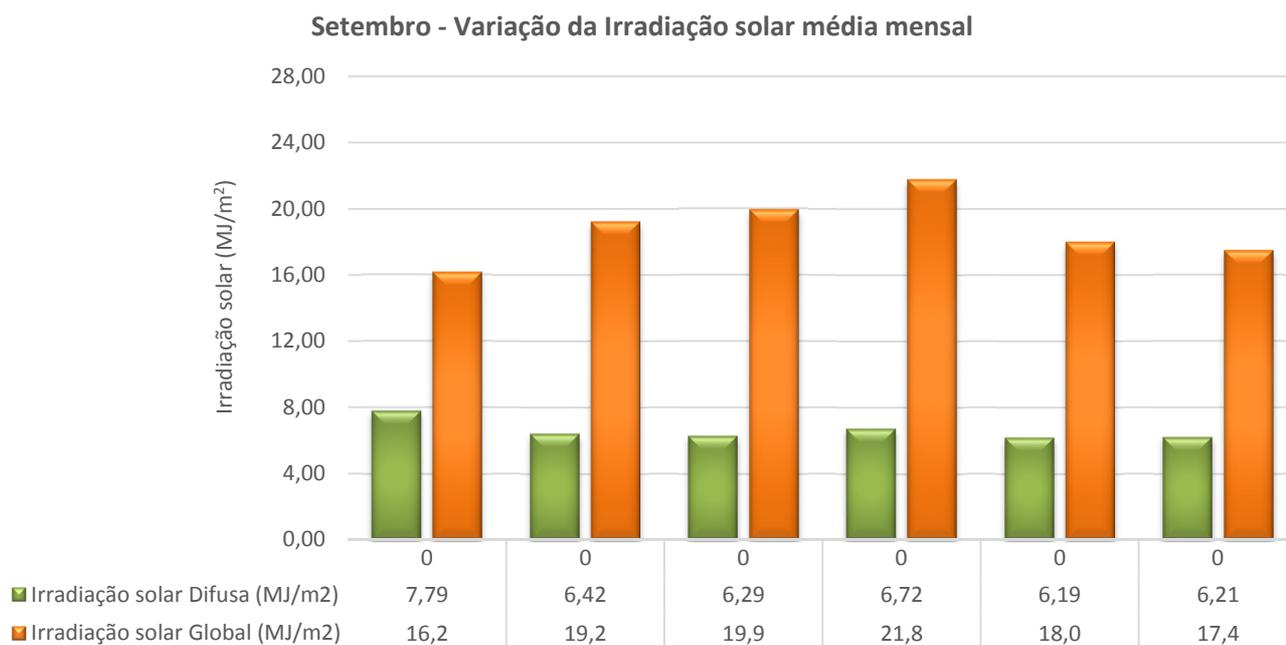


Figura 73 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global e Difusa para Setembro.

### 3.6.3 Outubro

No gráfico da Figura 74 está representada a variação mensal da Irradiação solar Difusa durante o mês de Outubro. Através da análise da Figura 74 pode-se verificar que a Irradiação solar Difusa toma valores médios diários entre os 2 MJ/m<sup>2</sup> e os 8 MJ/m<sup>2</sup> ao longo de todo o mês.

Por fim é possível constatar que o Município de Campo Maior apresenta uma menor Irradiação solar Difusa relativamente aos outros Municípios em análise. A nível global o comportamento da Irradiação solar Difusa ao longo do mês foi bastante semelhante nos Municípios do Alto Alentejo.

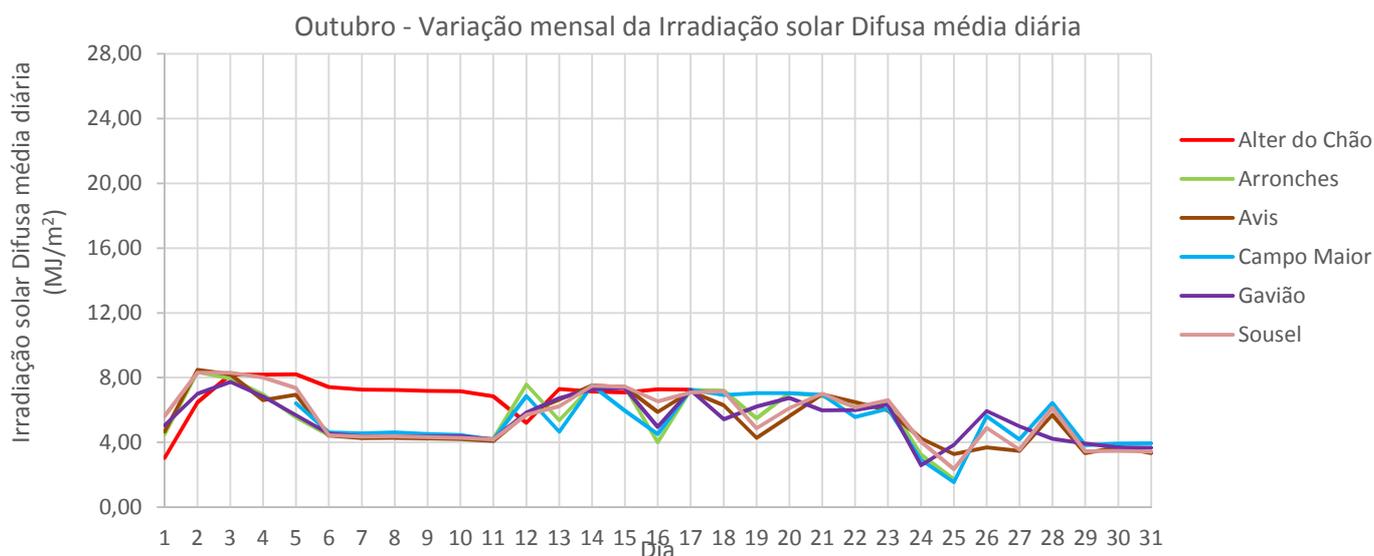


Figura 74 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Difusa média diária para o mês de Outubro.

Na Figura 75 pode-se verificar que a Irradiação solar Difusa diminui comparativamente ao mês anterior para valores entre os 5 MJ/m<sup>2</sup> e os 6 MJ/m<sup>2</sup>, à exceção de Alter do Chão que apresenta a média mais elevada devido à incorreta localização do piranómetro.

A Irradiação solar Global acompanhou também essa diminuição, devido às condições meteorológicas, ou seja devido a dias com elevado índice de nuvens no céu e devido a uma elevada nebulosidade que provocou a obstrução da componente Direta da Radiação solar. Devido a estes fenómenos a componente Difusa da Radiação solar passa a ter uma maior peso na Radiação Global, aproximadamente 47%, ou seja um aumento de 12% relativamente ao mês anterior.

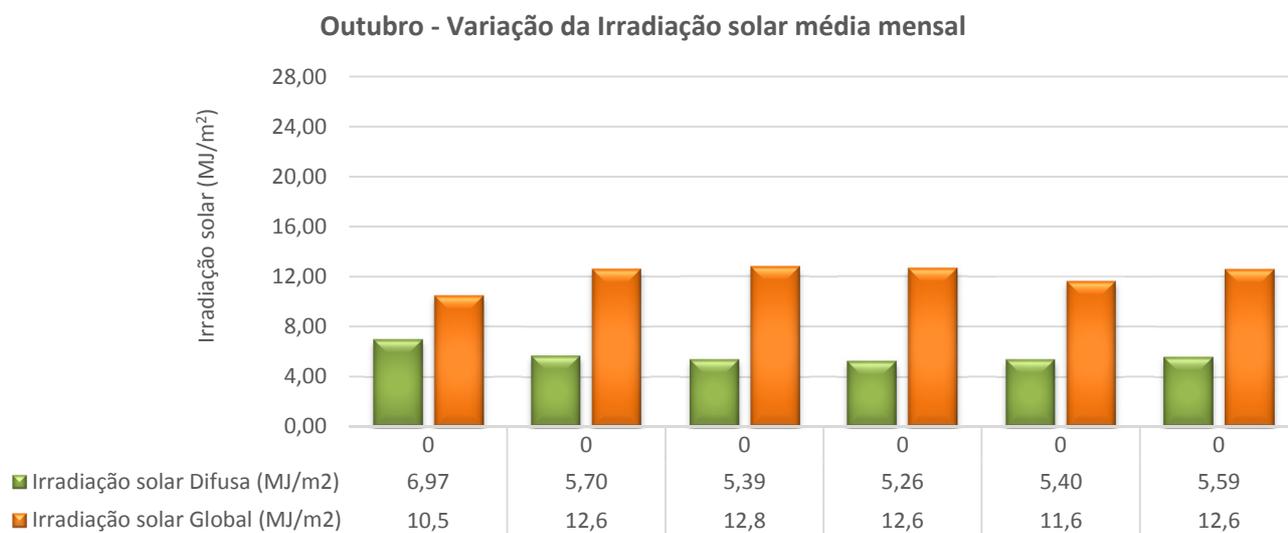


Figura 75 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global e Difusa para Outubro.

### 3.6.4 Novembro

Para o mês de Novembro já existem dados disponíveis de Radiação solar Global para a estação meteorológica de Marvão pelo que foi possível efetuar a extrapolação. Por outro lado neste mesmo mês foi possível registar os primeiros dados de Radiação solar Difusa para a estação meteorológica de Portalegre.

A Figura 76 revela a variação mensal da Irradiação solar Difusa média diária, através da análise da qual é possível concluir que a componente Difusa tomou valores entres os 2 MJ/m<sup>2</sup> e os 6 MJ/m<sup>2</sup> ao longo do mês de Novembro.

Por outro lado pode-se constatar que o Município de Marvão ao longo do mês apresenta os valores mais baixos de Irradiação solar Difusa. A nível comportamental observa-se uma variação semelhante nos Municípios do Alto Alentejo, alvos da presente análise.

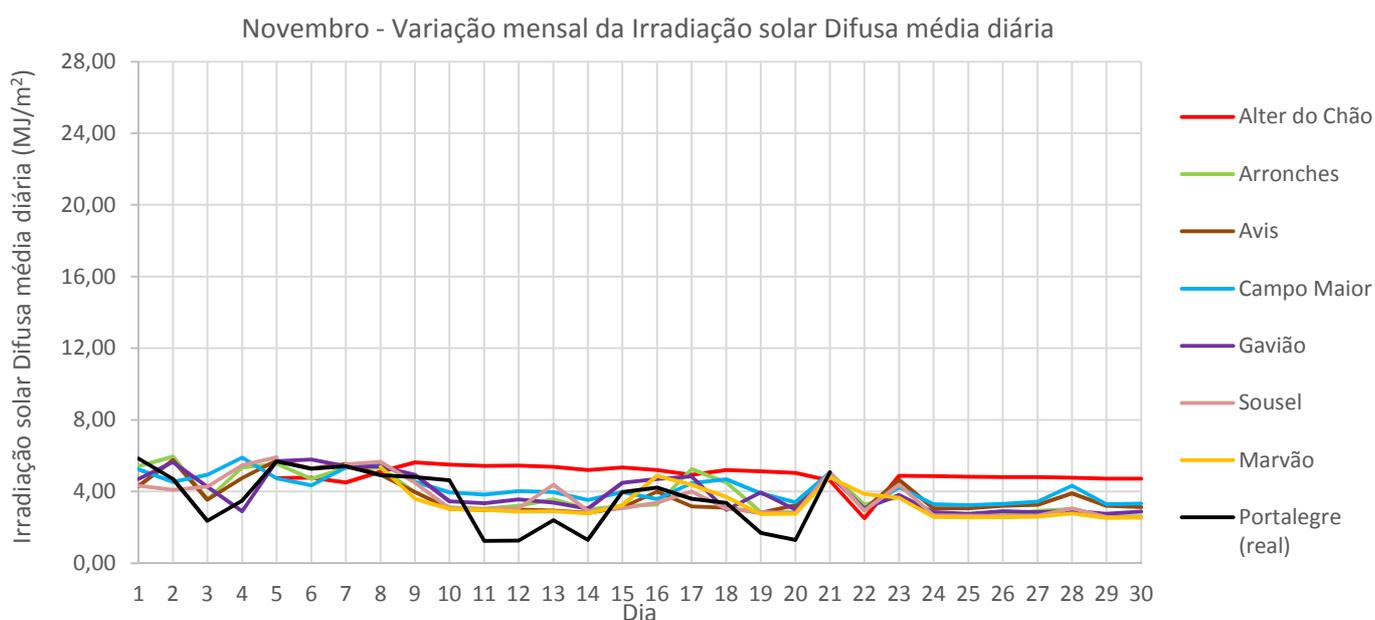


Figura 76 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Difusa média diária para o mês de Novembro.

Em termos médios mensal (Figura 77) a Irradiação solar Difusa oscilou entre os 3 MJ/m<sup>2</sup> e os 5 MJ/m<sup>2</sup>, dependendo do Município em questão. Relativamente ao mês anterior (Outubro) observa-se uma diminuição da Irradiação solar Global, bem como da componente Difusa.

A diminuição referida anteriormente deve-se a um agravamento das condições meteorológicas que afetam negativamente a quantidade de Energia captada por um determinada superfície no plano horizontal. Contudo verifica-se uma diminuição da percentagem de Irradiação solar Difusa relativamente ao mês anterior, sendo que no mês de Novembro representa 40% do total da Irradiação solar Global.

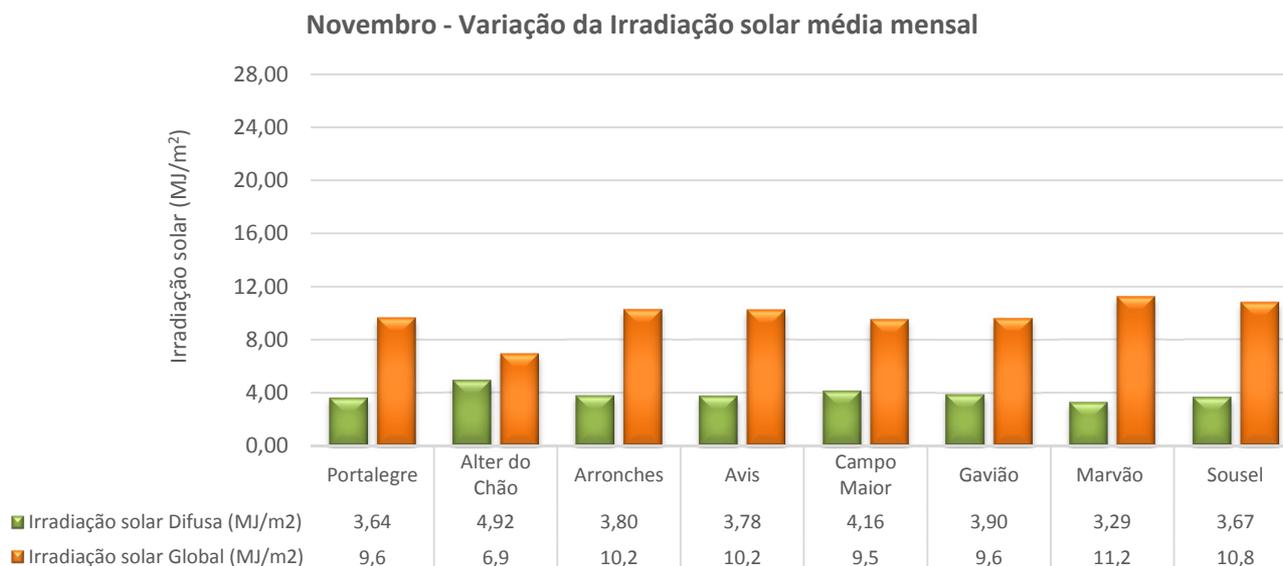


Figura 77 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global e Difusa para Novembro.

### 3.6.5 Dezembro

A Figura 78 ilustra a variação mensal da Irradiação solar Difusa média diária, através da qual é possível concluir que a componente Difusa oscilou entres os 2 MJ/m<sup>2</sup> e os 9 MJ/m<sup>2</sup> ao longo do mês de Dezembro.

Através da observação da Figura 78 é possível verificar que os Município de Gavião e Marvão ao longo do mês apresentam os valores mais baixos de Irradiação solar Difusa. Por outro lado no Município de Portalegre registaram-se diversos picos mais acentuados entre os 5 MJ/m<sup>2</sup> e os 9 MJ/m<sup>2</sup> nos dias 26 a 30 de Dezembro. A nível comportamental observa-se uma variação relativamente semelhante nos Municípios do Alto Alentejo analisados.

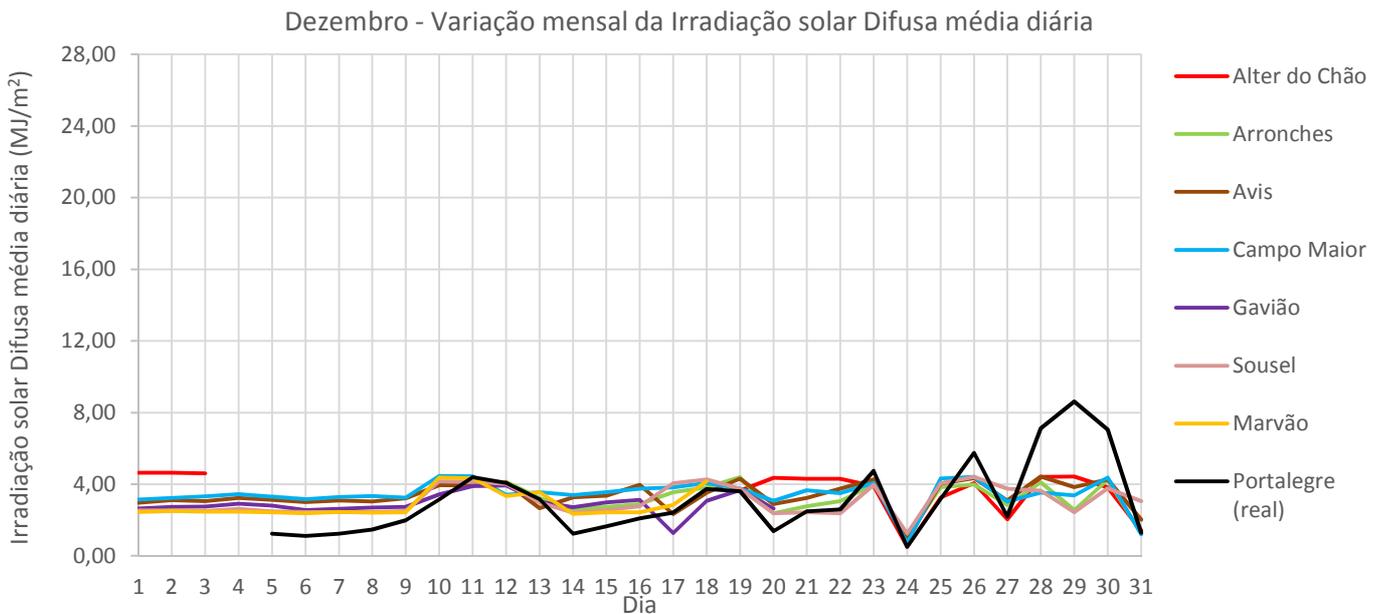


Figura 78 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar Difusa média diária para o mês de Dezembro

A nível médio mensal (Figura 79) a Irradiação solar Difusa oscilou entre os 2 MJ/m<sup>2</sup> e os 4 MJ/m<sup>2</sup>, dependendo do Município em questão. Relativamente ao mês anterior (Novembro) observa-se uma diminuição da Irradiação solar Global, bem como da componente Difusa devido ao agravamento das condições climáticas que afetam de forma negativa a quantidade de Energia captada por um determinada superfície no plano horizontal. Contudo verifica-se o aumento da percentagem de Irradiação solar Difusa relativamente ao mês anterior, sendo que no mês de Dezembro representa 45% do total da Irradiação solar.

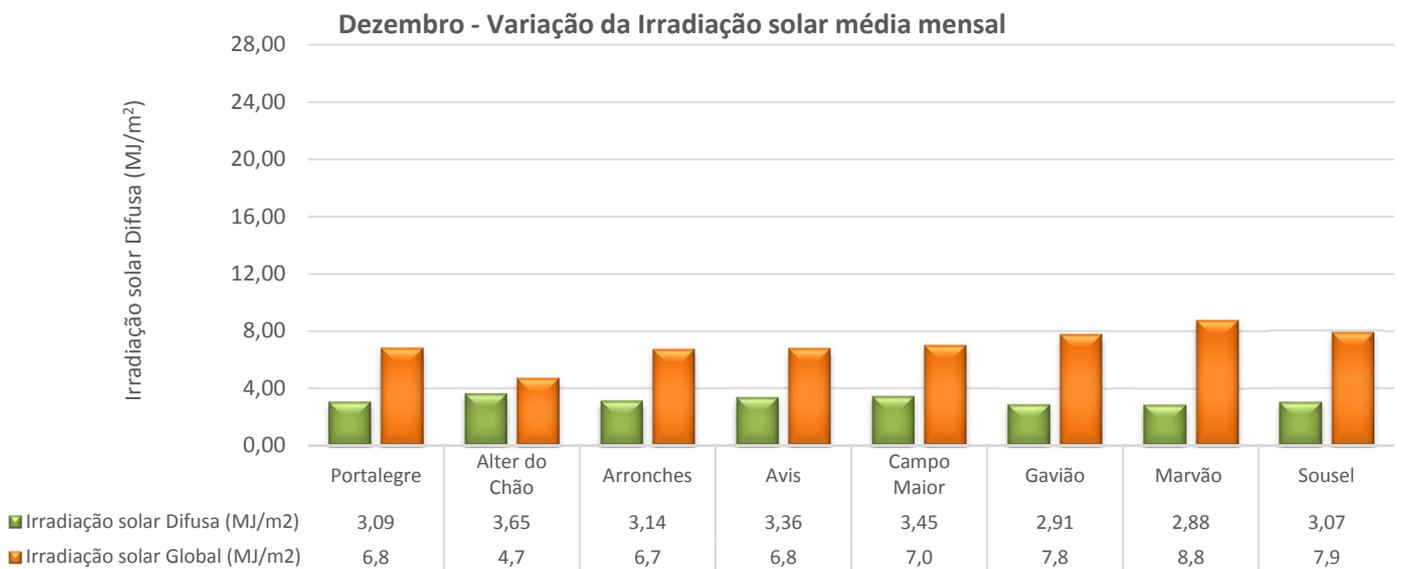


Figura 79 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar Global e Difusa para Dezembro.

### 3.6.6 Análise semestral

O presente subcapítulo consiste na análise semestral da Radiação solar Difusa que corresponde ao período compreendido entre Agosto e Dezembro de 2013. Para esse fim foi determinada a média semestral da Irradiação solar Difusa ( $\bar{H}_{d\text{-semestral}}$ ) e da Irradiação solar Global ( $\bar{H}_{h\text{-semestral}}$ ) (equação 3.7) para cada Município do Alto Alentejo. O valor de  $\bar{H}_{d\text{-semestral}}$  é obtido através da seguinte equação:

$$\bar{H}_{d\text{-semestral}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{mês}}} \bar{H}_{d\text{-mensal}}}{n_{\text{mês}}} \text{ [MJ/m}^2\text{]} \quad 3.27$$

Em que  $n_{\text{mês}}$  corresponde ao número de meses para o qual é efetuada a análise.

Na Figura 80 estão representados os resultados obtidos a partir da equação 3.27 para a Irradiação solar Difusa semestral, bem como os valores de Irradiação solar Global semestral em igual período. Os Municípios de Portalegre e Marvão não estão representados no gráfico uma vez que apenas existem dados para estes dois Municípios desde Novembro.

Através da análise da Figura 80 pode-se concluir que de uma forma geral a Irradiação solar Difusa oscila entre os 5 MJ/m<sup>2</sup> e os 6 MJ/m<sup>2</sup>, apresentando uma média semestral na ordem dos 5,4 MJ/m<sup>2</sup>. O Município de Sousel de entre os vários do Alto Alentejo é o que apresenta uma maior média semestral de Irradiação solar Global (15,31 MJ/m<sup>2</sup>) e uma menor média semestral de Irradiação solar Difusa (5,13 MJ/m<sup>2</sup>).

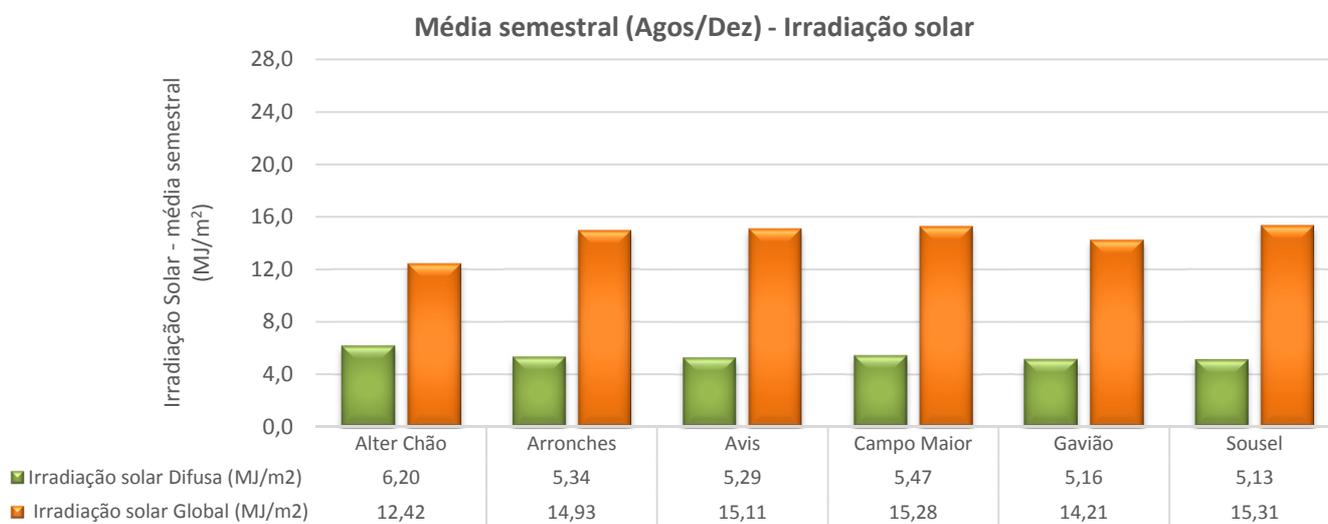


Figura 80 – Gráfico com a média semestral da Irradiação solar Difusa e Global para o Alto Alentejo.

Para a elaboração do mapa semestral da Irradiação solar Difusa foram utilizados os resultados anteriores, bem como a cartografia do Alto Alentejo cedida gentilmente pela CIMAA em formato 'DWG' tendo sido utilizado o *Software 'Autocad'* como auxiliar. Para além disso utilizei o esquema de cores por classes definido anteriormente, de acordo com o nível de Irradiação solar.

No mapa da Figura 81 é possível verificar que todos os Municípios do Alto Alentejo (exceto Portalegre e Marvão) apresentam uma média semestral de Irradiação solar Difusa entre os 4 a 6 MJ/m<sup>2</sup> que representa cerca de 32,7% da Irradiação solar total incidente no Alto Alentejo no período referido.

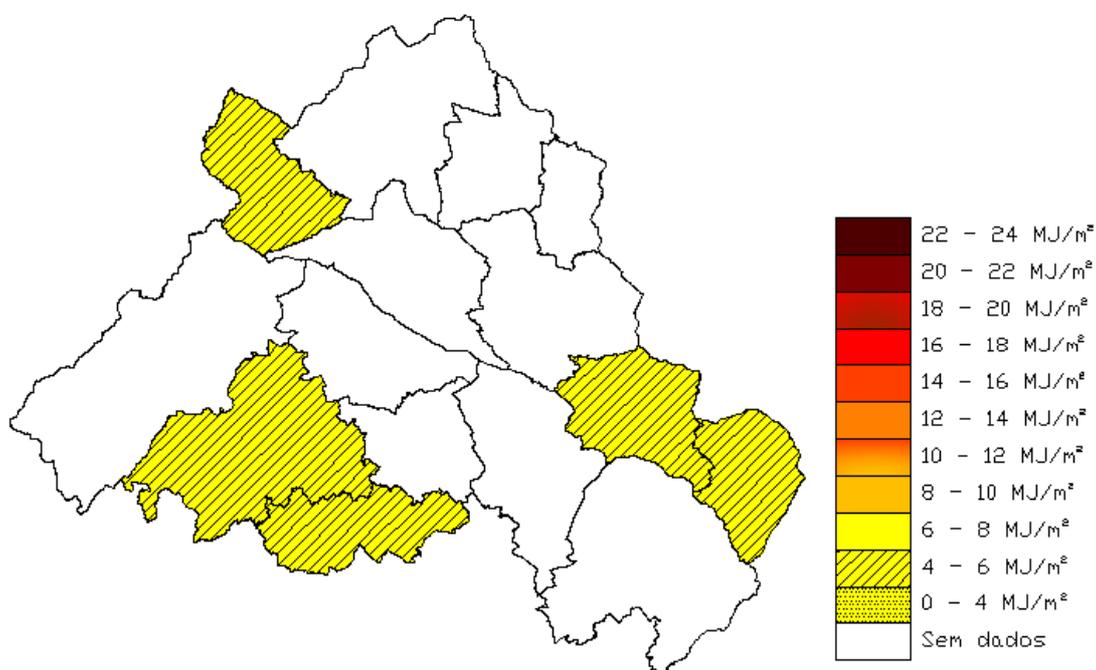


Figura 81 - Mapa com a média semestral da Irradiação solar Difusa para o Alto Alentejo.

### 3.7 Estudo das correlações da Radiação solar DNI

#### 3.7.1 Calibração relativa do pireliómetro

A estação central de Portalegre, de entre as várias estações meteorológicas instaladas, é a única que está habilitada com a devida instrumentação para efetuar a medida da Radiação solar DNI. A determinação da Radiação solar DNI a partir da Radiação solar Global é um processo bastante complexo que requer a determinação e medição de diversos parâmetros meteorológicos auxiliares durante um período mínimo de um a dois anos.

Devido à limitação da instrumentação utilizada para o presente estudo e ao curto período de medições não foi possível efetuar o estudo das correlações que permitem estimar a Radiação solar DNI. Em alternativa procedeu-se, de uma forma simplificada, à determinação de correlações que permitam estimar a Radiação solar DNI para os restantes Municípios a partir da Radiação solar Global medida.

Contudo antes de se proceder à determinação das correlações efetuou-se a validação dos dados utilizados, ou seja foi verificada a calibração relativa do pireliómetro em relação aos piranómetros utilizados para a medição da Radiação solar Global e Difusa. Para efetuar a referida validação dos dados é necessário que os dados utilizados verifiquem a seguinte condição de acordo com a equação 2.11 e 2.12:

$$I_{DNI} = \frac{I_h - I_d}{\cos \theta} \quad 3.28$$

Ou seja o valor de  $I_{DNI}$  medido através do pireliómetro tem de ser igual ao valor obtido através da equação 3.28. Em que os valores de  $I_h$  e  $I_d$  são obtidos em igual período pelos piranómetros da estação de Portalegre e o valor de  $\cos \theta$  é obtido através da equação 2.10.

Para efetuar este estudo foram selecionados quatro dias de céu limpo correspondentes ao período de 11 de Novembro a 14 de Novembro como se pode observar no gráfico da Figura 82.

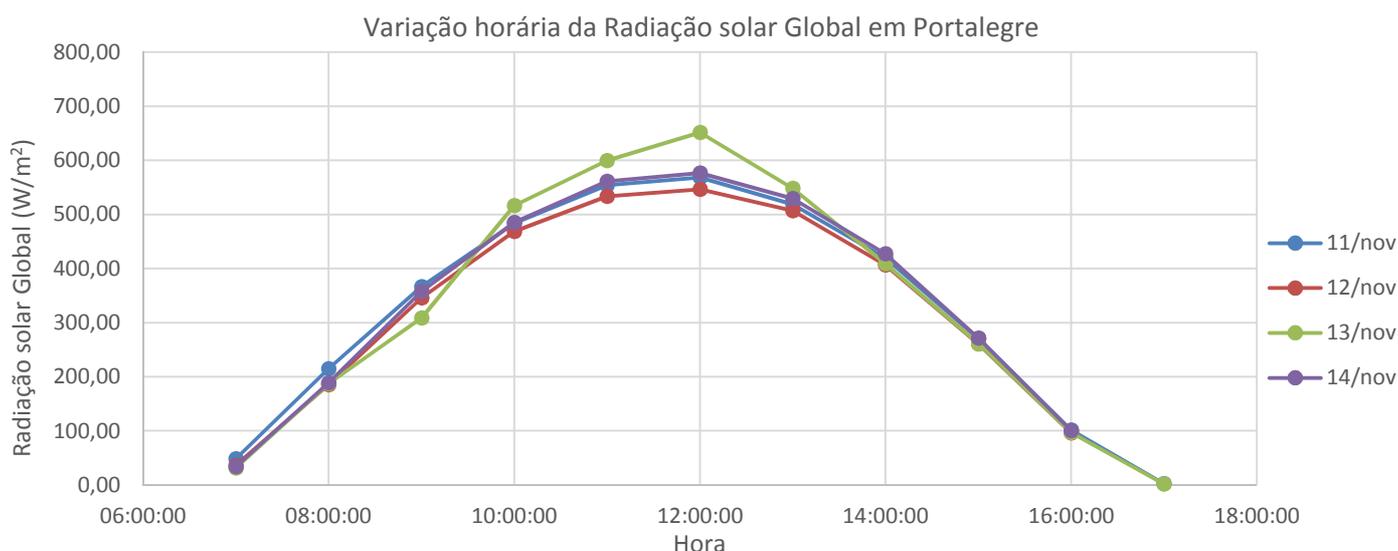


Figura 82 - Variação horária da Radiação solar Global em Portalegre para o período de 11 a 14 de Novembro.

Utilizando os valores horários da Radiação solar Global e Difusa medidos na estação central de Portalegre procedeu-se ao cálculo dos valores horários da Radiação solar DNI através da equação 3.28.

Com os resultados obtidos foram elaborados quatro gráficos através dos quais é possível comparar os valores medidos pelo pireliómetro e os valores obtidos através da equação 3.28. Para além disso está também presente nos gráficos a diferença entre os resultados obtidos e os medidos pelo pireliómetro que corresponde à diferença de calibração entre o pireliómetro e os piranómetros.

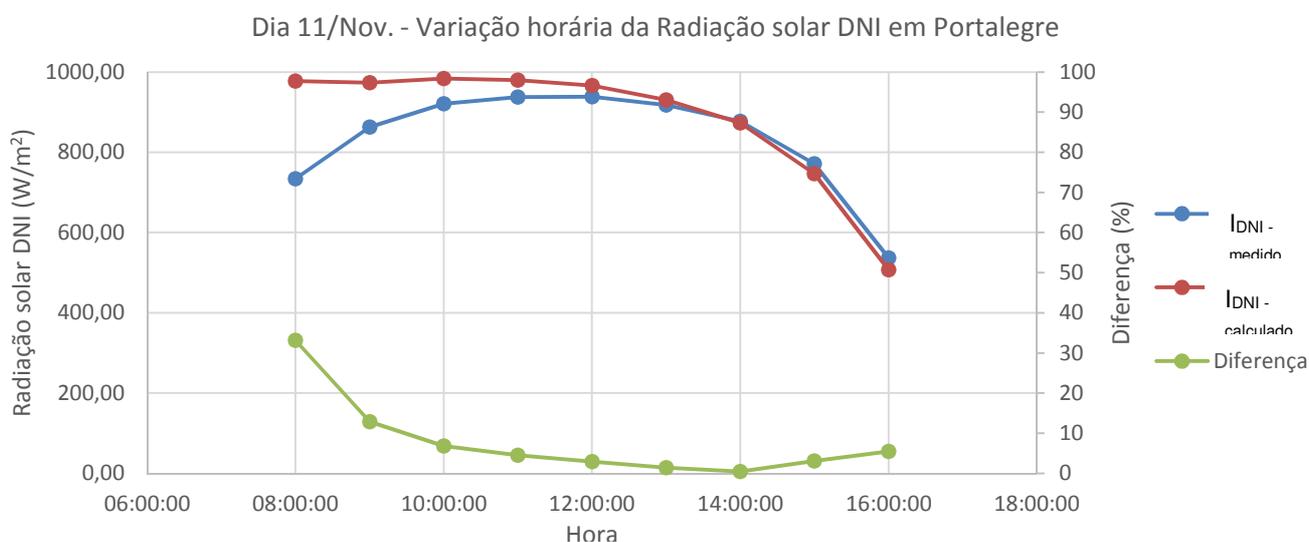


Figura 83 - Dia 11/Nov - comparação entre os valores horários de Radiação solar DNI medidos e calculados.

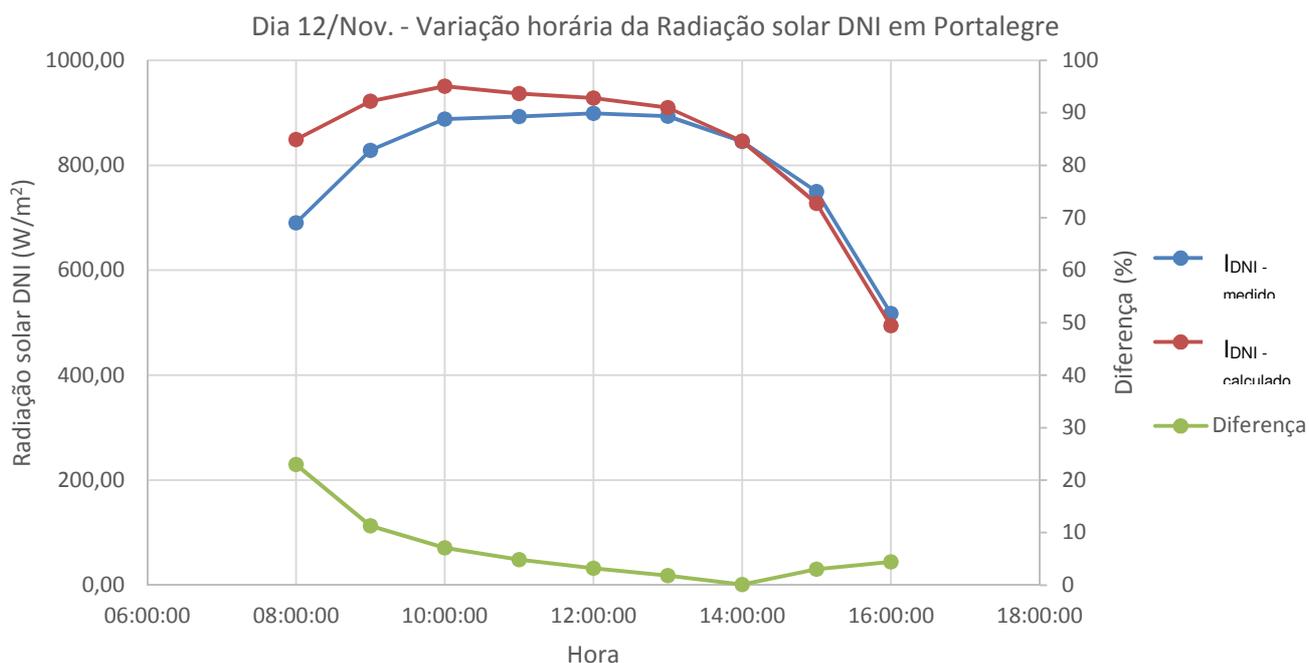


Figura 84 - Dia 12/Nov - comparação entre os valores horários de Radiação solar DNI medidos e calculados.

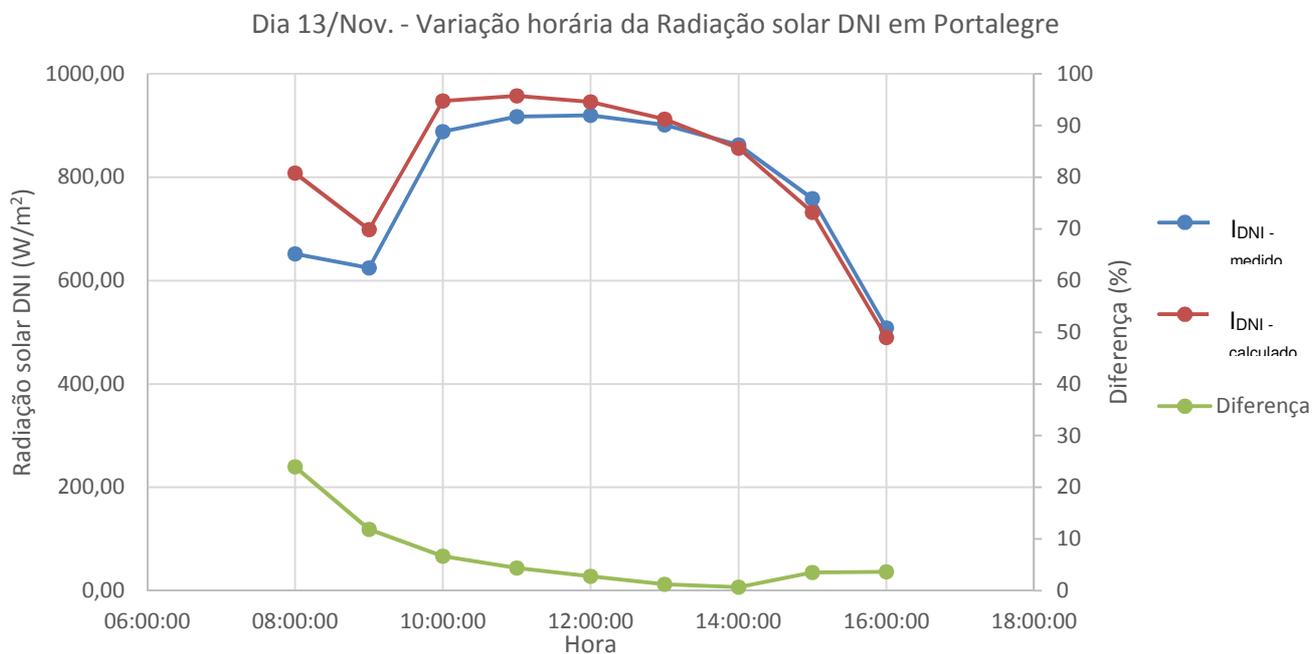


Figura 85 - Dia 13/Nov - comparação entre os valores horários de Radiação solar DNI medidos e calculados.

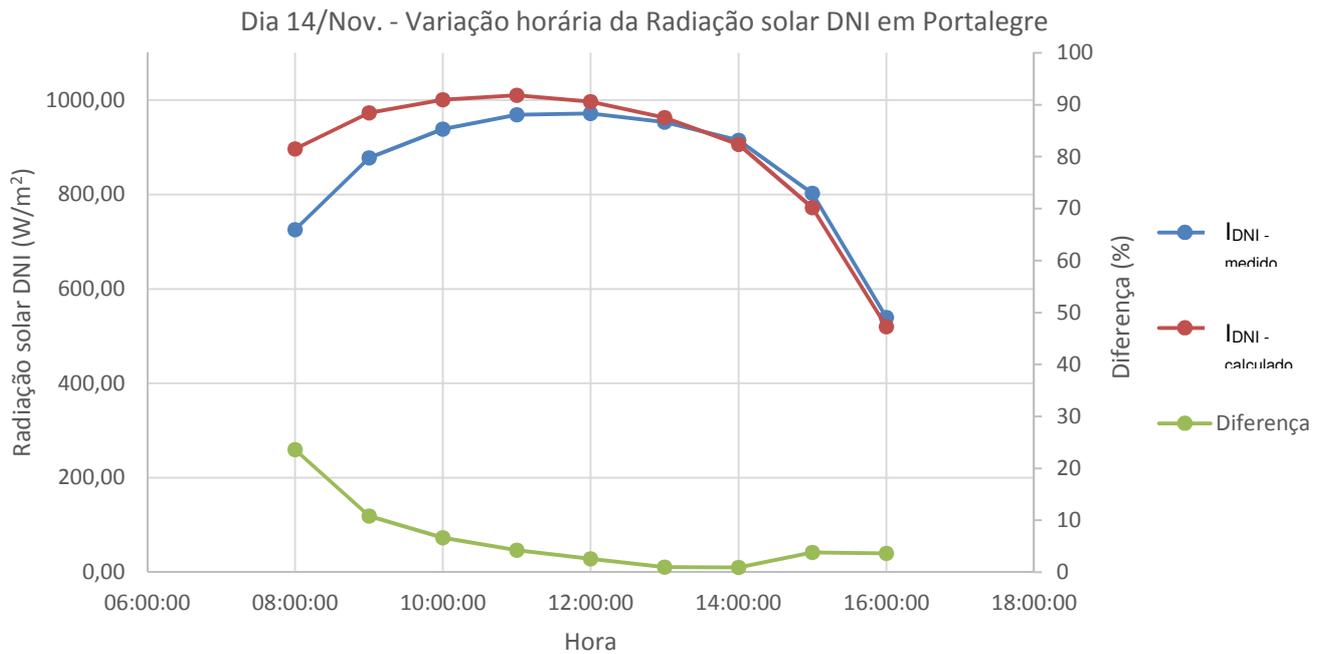


Figura 86 - Dia 14/Nov - comparação entre os valores horários de Radiação solar DNI medidos e calculados.

Através da análise das Figuras e dos resultados obtidos, conclui-se que existe uma maior diferença de resultados nas horas correspondentes aos nascer do sol. Em termos médios a diferença de resultados é da ordem dos 6,8%. Uma vez que a diferença de resultados é relativamente pequena pode-se considerar que os dados utilizados para o estudo das correlações da Radiação solar DNI são válidos.

### 3.7.2 Metodologia utilizada para o estudo

Efetuada a validação dos dados e verificada a calibração relativa do pireliómetro deu-se início ao estudo das correlações propriamente dito. Para o estudo realizado partiu-se dos dados de Irradiação solar Global e DNI obtidos na estação de Portalegre, durante o período de 1 de Novembro de 2013 até 9 de Janeiro de 2014. O período de dados utilizado é bastante reduzido porque foi o único período para o qual foi possível obter dados em simultâneo de Radiação solar Global e DNI, sendo que o estudo realizado apresenta um significado estatístico bastante reduzido.

Os dados médios diários de Irradiação solar DNI ( $\overline{H_{DNI}}$ ) e os valores de  $K_T$  utilizados para este estudo encontram-se no Quadro 6. Os valores de  $K_T$  utilizados neste estudo são os mesmos valores determinados para o estudo das correlações da Radiação solar Difusa.

Quadro 6 – Valores de  $K_T$  e Irradiação solar DNI em Portalegre durante o período compreendido entre o dia 1/11/2013 até 09/01/2014.

Dia	Novembro		Dezembro		Janeiro	
	$K_T$	Irradiação solar DNI (MJ/m <sup>2</sup> )	$K_T$	Irradiação solar DNI (MJ/m <sup>2</sup> )	$K_T$	Irradiação solar DNI (MJ/m <sup>2</sup> )
1	0,577	12,03			0,071	0,00
2	0,282	3,51			0,074	0,00
3	0,617	20,81			0,154	0,01
4	0,184	0,02			0,125	0,00
5	0,461	5,84	0,703	25,30	0,179	0,01
6	0,303	1,39	0,734	27,34	0,117	0,00
7	0,331	1,40	0,712	25,74	0,061	0,00
8	0,465	7,76	0,722	24,92	0,527	0,09
9	0,585	14,93	0,716	23,25	0,509	0,10
10	0,604	13,41	0,632	16,84		
11	0,722	27,84	0,393	3,80		
12	0,696	26,87	0,292	0,11		
13	0,750	26,05	0,229	0,16		
14	0,741	28,65	0,689	23,72		
15	0,631	15,86	0,677	21,99		
16	0,433	8,26	0,669	19,08		
17	0,512	11,57	0,198	1,04		
18	0,599	16,73	0,269	0,12		
19	0,707	24,52	0,324	3,18		
20	0,719	25,99	0,709	24,42		
21	0,443	4,76	0,632	16,73		
22			0,629	17,15		
23			0,356	0,75		
24			0,036	0,00		
25			0,250	0,03		
26			0,440	0,06		
27			0,157	0,00		
28			0,568	0,09		
29			0,654	0,06		
30			0,514	0,07		
31			0,092	0,00		

De seguida procedeu-se à filtragem dos dados utilizados, ou seja, os dias cujos valores de  $\overline{H_{DNI}}$  são inferiores a  $0,20 \text{ MJ/m}^2$  foram excluídos da análise, uma vez que  $\overline{H_{DNI}} < 0,20 \text{ MJ/m}^2$  significa que o dia em questão esteve praticamente nublado e portanto a Radiação solar para esse dia foi praticamente toda Difusa pelo que esse valor de  $\overline{H_{DNI}}$  não apresenta significado quando é elaborado um gráfico de  $\overline{H_{DNI}}$  em função de  $K_T$ . Para este estudo parti de uma amostra de 57 dias e após a filtragem a amostra ficou reduzida a 36 dias, sendo que os dias que foram excluído da análise estão assinalados a verde no Quadro 6.

Concluída a filtragem e recorrendo às ferramentas numéricas do *Software Microsoft Excel* procedi à elaboração dos dois gráficos que se ilustram (Figura 87 e Figura 88) com  $\overline{H_{DNI}}$  em função de  $K_T$  com o objetivo de obter duas correlações que permitam determinar o valor de  $\overline{H_{DNI}}$  a partir do valor de  $K_T$  para cada estação meteorológica instalada no Alto Alentejo.

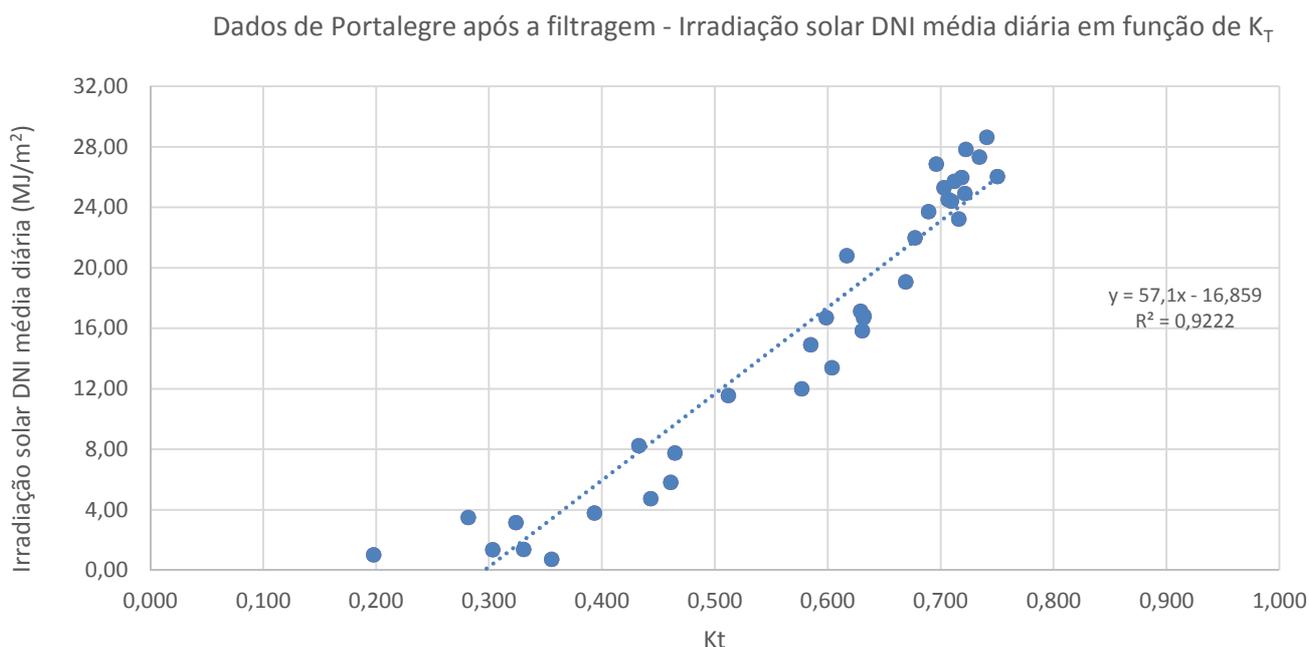


Figura 87 - Gráfico com a variação da Irradiação solar DNI média diária em função de  $K_T$  – Dados de Portalegre após a filtragem; Correlação de 1º grau.

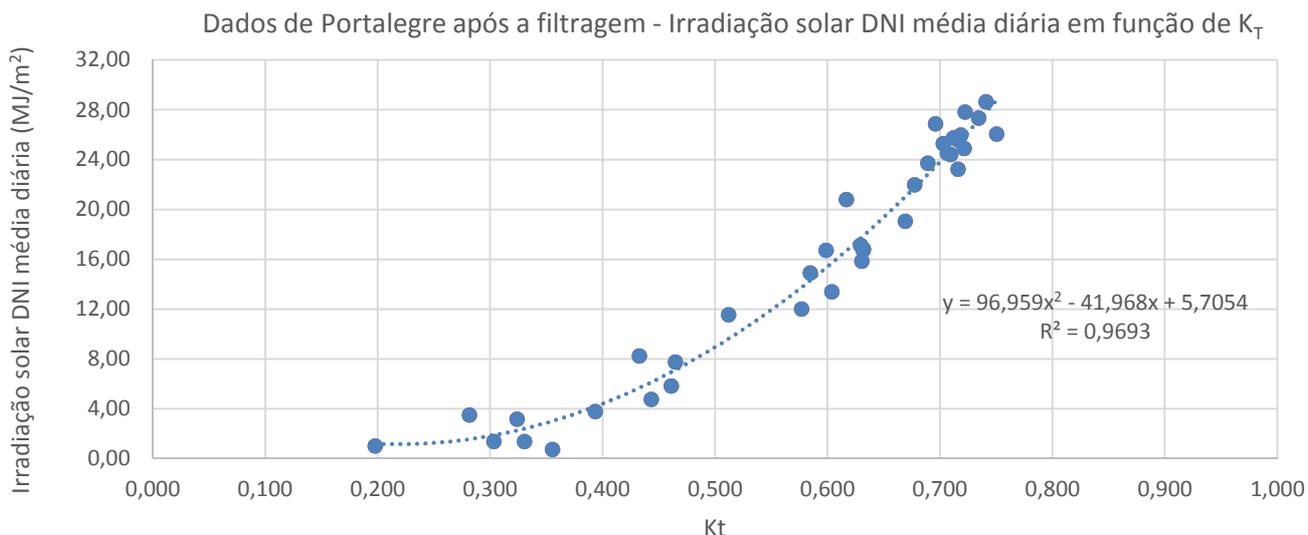


Figura 88 - Gráfico com a variação da Irradiação solar DNI média diária em função de  $K_T$  – Dados de Portalegre após a filtragem; Correlação de 2º grau.

Como se pode observar na Figura 87 e Figura 88 as correlações são dadas pelas seguintes equações, respetivamente:

$$\overline{H_{DNI}} = -16,859 + 57,100(K_T) \quad R^2 = 0,9222 \quad 3.29$$

$$\overline{H_{DNI}} = 5,7054 - 41,9680(K_T) - 96,9590(K_T^2) \quad R^2 = 0,9693 \quad 3.30$$

Em que  $R^2$  é o coeficiente de determinação que é utilizado para determinar a relação linear entre os valores calculados e os valores medidos [21].

De salientar que a amostra de dados utilizados para o presente estudo é bastante reduzida e apenas contempla valores de  $H_{DNI}$  inferiores a 30 MJ/m<sup>2</sup>, portanto apresenta um baixo significado estatístico e para valores esperados de  $H_{DNI}$  superior a 30 MJ/m<sup>2</sup> poderá induzir em erro. Um estudo desta natureza deverá ter uma amostra mínima de dados compreendidos entre um e dois anos de medições contínuas das várias componentes da Radiação solar.

### 3.7.3 Análise das correlações e resultados

Com o objetivo de avaliar qual das duas correlações apresentadas anteriormente melhor se adequa à amostra de dados disponível e que permita efetuar a extrapolação da Radiação solar DNI para os Municípios do Alto Alentejo com o menor erro associado possível, procedeu-se à determinação de diversos parâmetros estatísticos que são obtidos a partir das equações 3.17 a 3.24, de forma semelhante ao método utilizado para o estudo das correlações da Radiação solar Difusa.

Os resultados obtidos para os parâmetros estatísticos mencionados anteriormente encontram-se no Quadro 7. Através da análise dos resultados obtidos foi possível chegar à conclusão que a equação de 2º grau dada pela equação 3.30 é a que apresenta melhores resultados, nomeadamente ao nível do valor de  $R^2$ , SSRE, RSE, MBE e RMSE.

Quadro 7 – Resultados dos parâmetros estatísticos para as duas correlações em estudo.

	<b>EQ. 1º GRAU (3.29)</b>	<b>EQ. 2º GRAU (3.30)</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9222	0,9693
<b>MPE</b>	-5,58	10,46
<b>MAPE</b>	-5,58	10,46
<b>SSRE</b>	57,54	10,81
<b>RSE</b>	1,26	0,55
<b>MBE</b>	-0,0002	0,0004
<b>RMSE</b>	2,584	1,622

Utilizando as duas correlações determinadas (3.29 e 3.30) procedi ao cálculo dos valores de  $H_{DNI}$  para o período correspondente à amostra. Com os resultados obtidos através das correlações elaborei o gráfico da Figura 89 que contem os valores de  $H_{DNI}$  obtidos através das correlações, bem como os valores de  $H_{DNI}$  medidos na estação central de Portalegre durante o período em análise.

Mais uma vez, através da análise da Figura 89 pode-se concluir que a correlação de 2º grau (equação 3.30) é a que melhor se ajusta aos dados disponíveis, pelo que será a correlação utilizada para efetuar a extrapolação dos dados de  $H_{DNI}$  para os restantes Municípios do Alto Alentejo.

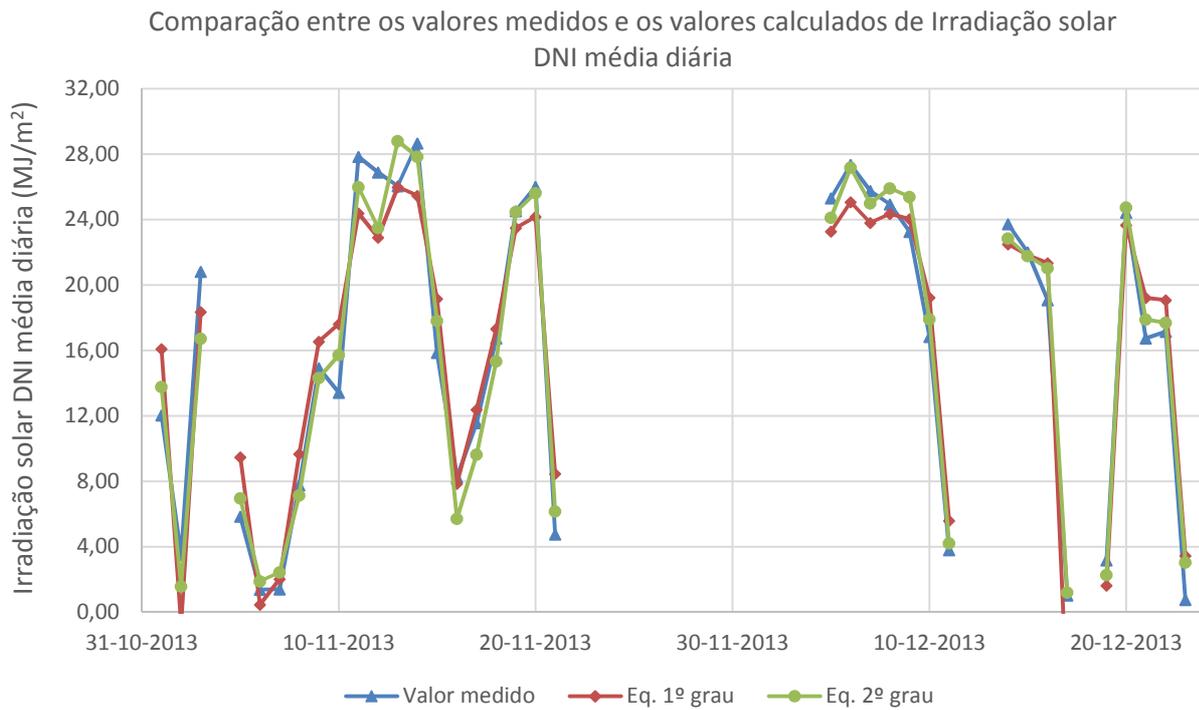


Figura 89 - Comparação entre os valores medidos e os valores calculados a partir das correlações da Irradiação solar DNI média diária.

### **3.8 Análise da Radiação solar DNI**

A presente secção é referente à análise da Radiação solar DNI obtida por extrapolação através da equação 3.30 e respetiva comparação com os dados medidos em Portalegre em igual período. Os gráficos que se ilustram de seguida apenas apresentam dados para os dias em que foi possível obter dados de Radiação solar Global e dizem respeito às estações meteorológicas instaladas nos Municípios do Alto Alentejo para o período compreendido entre Agosto e Dezembro de 2013 inclusive. Para cada mês são apresentados os seguintes tipos de gráficos:

- Variação mensal da Irradiação solar DNI média diária;
- Média mensal da Irradiação solar DNI.

#### **3.8.1 Agosto**

Através da análise da (Figura 90) pode-se verificar que os dados extrapolados a partir da equação 3.30, em termos de valor absoluto, diferem dos dados medidos na estação de Portalegre durante o mês de Agosto. Esta diferença de valores pode ser justificada pelo facto da equação 3.30 ter sido desenvolvida tendo por base valores de Irradiação solar DNI médios diários inferiores a  $30 \text{ MJ/m}^2$ , ou seja a correlação desenvolvida apresenta algumas limitações, especialmente para valores de Irradiação solar Global mais elevados, aos quais deveria corresponder também uma Irradiação solar DNI mais elevada. Essa diferença pode também ser justificada pela diferença relativa na calibração do pireliómetro e do piranómetro.

Por outro lado pode-se verificar que os resultados obtidos através da correlação apresentam o mesmo tipo de comportamento verificado nos dados medidos em Portalegre, ao longo do mês.

Contudo, através dos resultados obtidos é possível verificar que a Irradiação solar DNI média diária apresenta variações entre os  $10 \text{ MJ/m}^2$  e os  $40 \text{ MJ/m}^2$  durante o mês de Agosto, apresentando um comportamento bastante semelhante com diversos picos negativos e positivos

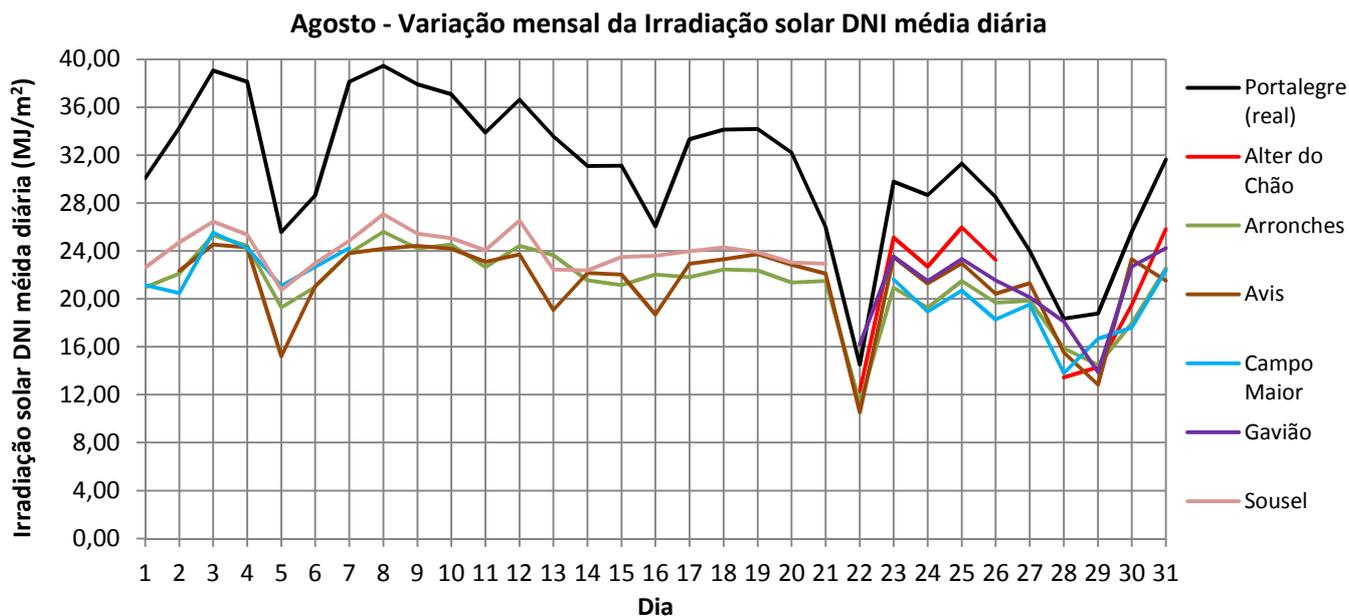


Figura 90 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar DNI média diária para o mês de Agosto.

Como forma de síntese mensal ilustra-se de seguida na Figura 91 o gráfico com a média mensal da Irradiação solar DNI ( $\bar{H}_{DNI-mensal}$ ) para o mês de Agosto nos vários Municípios do Alto Alentejo em estudo. Os valores médios mensais foram obtidos a partir da seguinte equação:

$$\bar{H}_{DNI-mensal} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{dia}} \bar{H}_{DNI}}{n_{dia}} \quad [MJ/m^2] \quad 3.31$$

Em que  $n_{dia}$  é o número total de dias do mês.

Dos dados apresentados na Figura 91 apenas é plausível retirar conclusões para os Municípios de Portalegre, Arronches e Avis porque são os únicos Municípios para os quais foi possível obter dados ao longo de todo o mês. Contudo e como já foi referido para valores de Radiação solar mais elevados os valores obtidos através da correlação apresentam um maior erro.

Porém em termos médios mensais a Irradiação solar DNI oscilou entre os 20 MJ/m<sup>2</sup> e os 30 MJ/m<sup>2</sup> durante o mês de Agosto, sendo que Portalegre registou os valores mais elevados.

### Agosto - Variação da Irradiação solar DNI média mensal

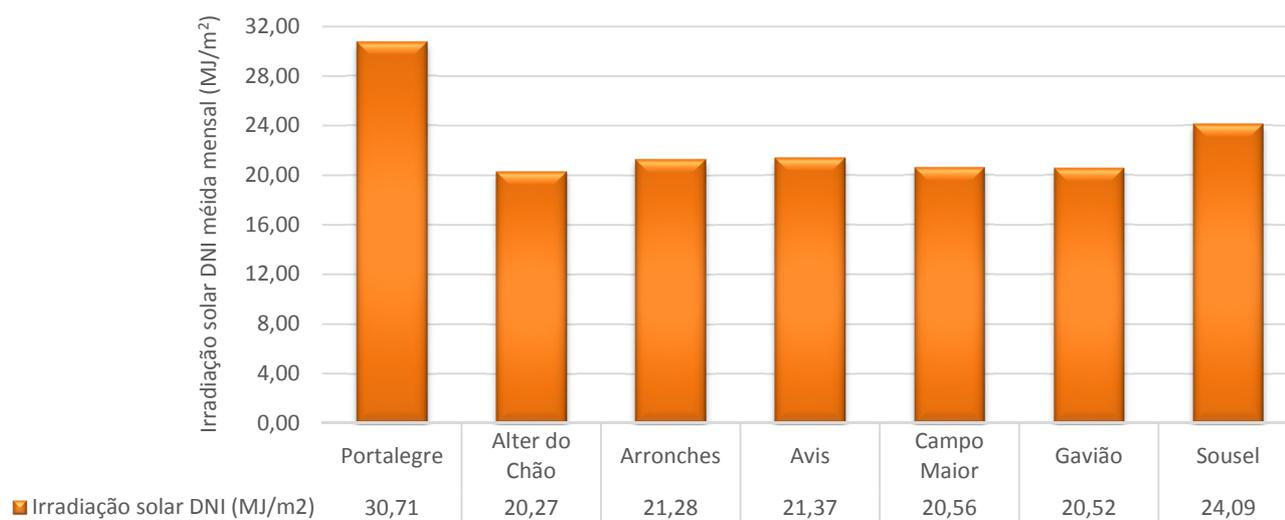


Figura 91 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar DNI para Agosto.

### 3.8.2 Setembro

A Figura 92 ilustra a variação mensal da Irradiação solar DNI ao longo do mês de Setembro. Como no mês de Setembro os níveis de Radiação solar são mais baixos, então a diferença entre os vários Municípios analisados e Portalegre é menor, ou seja o erro associado à extrapolação diminui com a diminuição da Irradiação solar DNI para valores entre os zero e os 30 MJ/m<sup>2</sup>. Por outro lado verifica-se que o Município de Alter do Chão apresenta uma diferença de valores considerável relativamente aos restante Municípios, sendo o Município com a menor Irradiação solar DNI. Contudo tal não significa que disponha de uma menor Irradiação solar DNI, uma vez que a sua estação está incorretamente instalada originando fenómenos de sombreamento, não sendo possível retirar conclusões válidas para este Município. Ainda assim está presente nos gráficos para ficar evidente o que a incorreta instalação de uma estação meteorológica pode causar ao nível da interpretação de resultados.

Em termos globais a Irradiação solar DNI média diária foi bastante irregular ao longo do mês verificando-se uma diminuição abrupta a partir do dia 23, passando a registar valores muito próximos de zero devido à ocorrência de períodos de chuva e céu nublado. A Irradiação solar DNI média diária não ultrapassou os 34 MJ/m<sup>2</sup> durante o mês.

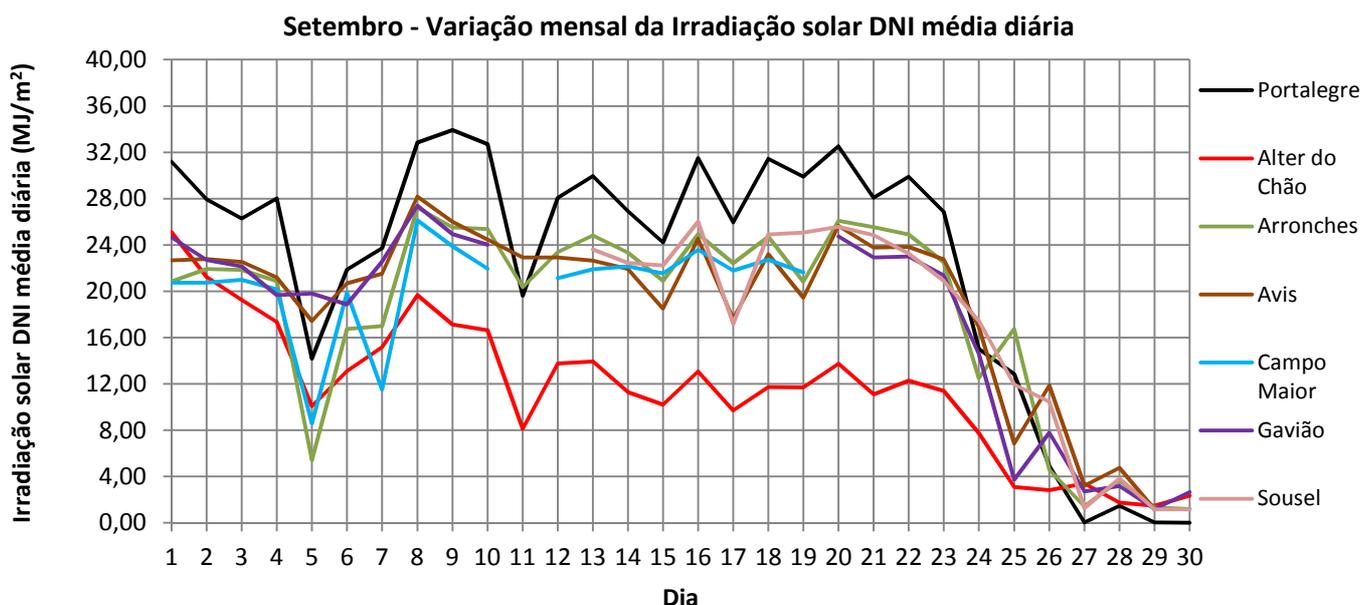


Figura 92 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar DNI média diária para o mês de Setembro.

Na Figura 93 pode-se observar a variação da Irradiação solar DNI durante o mês de Setembro, através da qual se pode concluir que a componente DNI da Radiação solar em termos médios mensais oscilou entre os 16 MJ/m<sup>2</sup> e os 23 MJ/m<sup>2</sup> nos Municípios em análise, exceto em Alter do Chão devido à incorreta instalação da estação.

Relativamente ao mês anterior (Agosto) verifica-se uma diminuição da Irradiação solar DNI devido às condições climáticas, sendo que a média mensal dos Municípios do Alto Alentejo (exceto Alter do Chão) foi de 19,07 MJ/m<sup>2</sup>.

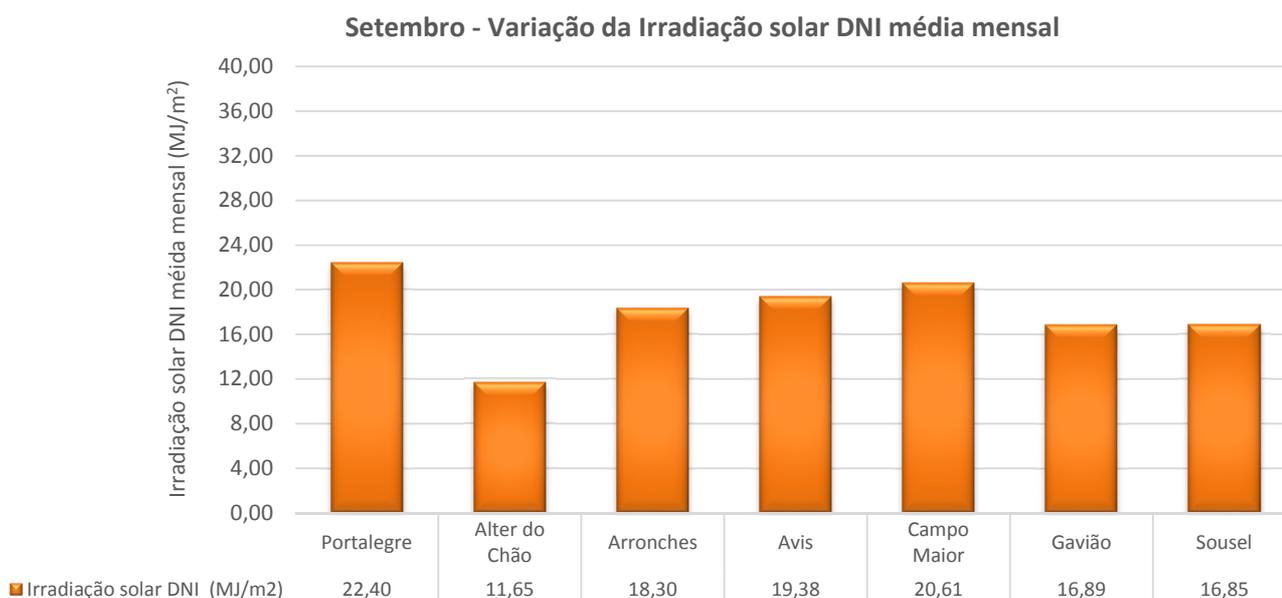


Figura 93 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar DNI para Setembro.

### 3.8.3 Outubro

No gráfico da Figura 94 está representada a variação mensal da Irradiação solar DNI durante o mês de Outubro. Através da análise da Figura 94 pode-se verificar que a Irradiação solar DNI apresenta uma grande variação ao longo do mês devido a períodos de chuva e céu nublado que corresponde a uma menor Irradiação solar DNI.

Em termos globais a Irradiação solar DNI em Outubro apresenta um comportamento idêntica em todos os Municípios (exceto Alter do Chão), tomando valores médios diários entre os zero e os 33 MJ/m<sup>2</sup> ao longo de todo o mês.

Entre os dias 6 e 11 de Outubro obtiveram-se valores de Irradiação solar Difusa relativamente baixos o que indica que a Radiação solar ocorrida durante esse período foi maioritariamente Direta.

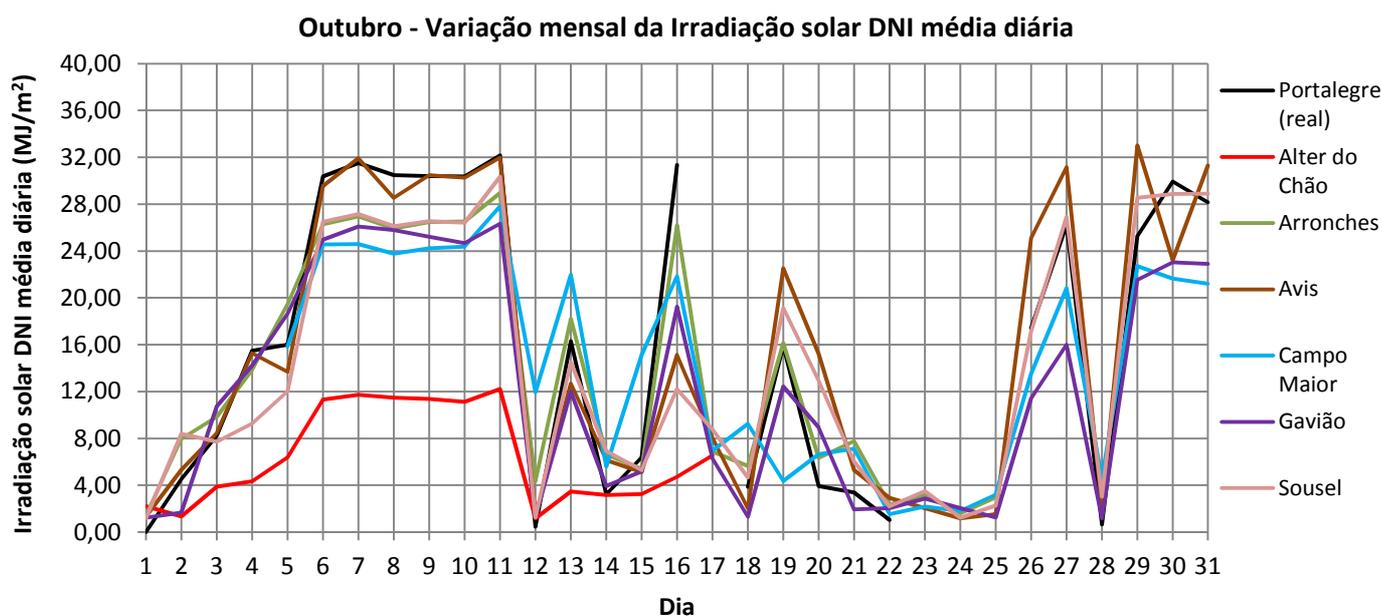


Figura 94 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar DNI média diária para o mês de Outubro.

Na Figura 95 pode-se verificar que a Irradiação solar DNI diminui comparativamente ao mês anterior para valores médios mensais entre os 12 MJ/m<sup>2</sup> e os 16 MJ/m<sup>2</sup>, à exceção de Alter do Chão, sendo que Portalegre regista a média mensal mais elevada (15,83 MJ/m<sup>2</sup>) e Gavião a média mais baixa (12,14 MJ/m<sup>2</sup>). A média mensal no Alto Alentejo para a Irradiação solar DNI foi de 14,14 MJ/m<sup>2</sup> em Outubro.

Essa diminuição é justificada pelas condições meteorológicas, ou seja devido a dias com elevado índice de nuvens no céu e devido a uma elevada nebulosidade que provocou a obstrução da componente Direta da Radiação solar.

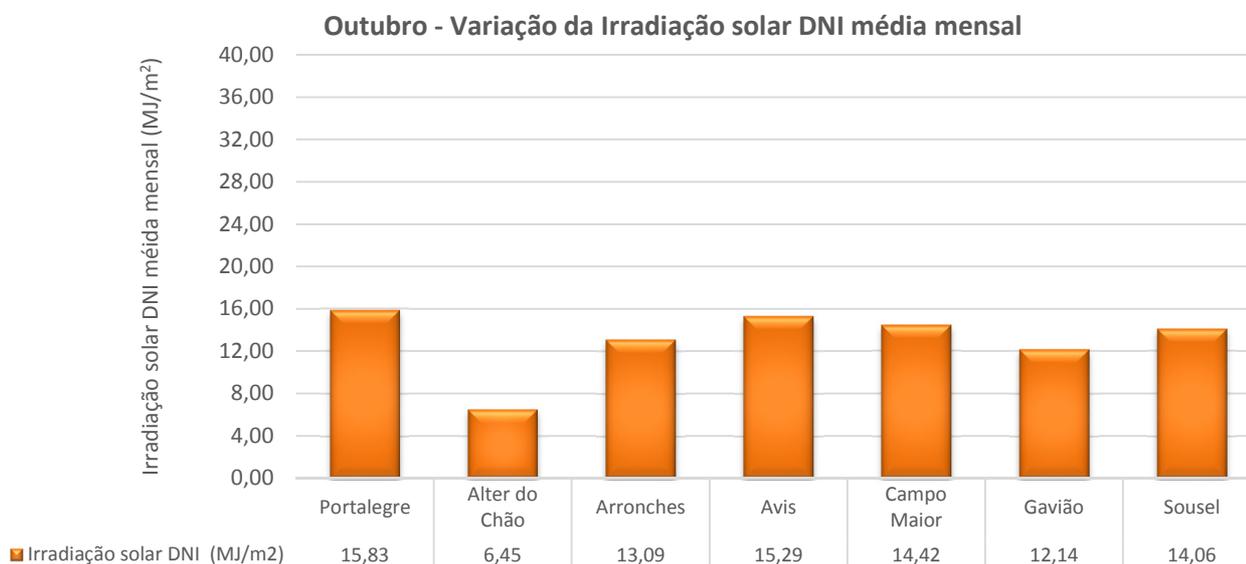


Figura 95 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar DNI para Outubro.

### 3.8.4 Novembro

Para o mês de Novembro já existem dados disponíveis de Radiação solar Global para a estação meteorológica de Marvão pelo que foi possível efetuar a extrapolação. A Figura 96 revela a variação mensal da Irradiação solar DNI média diária, através da análise da qual é possível concluir que a componente DNI tomou valores entres os zero e os 37 MJ/m<sup>2</sup> ao longo do mês de Novembro.

Por outro lado pode-se constatar que os Municípios apresentam um comportamento semelhante ao longo do mês, contudo verificam-se diferenças mais acentuados nos valores obtidos devido à diferença de condições meteorológicas ocorridas nos vários Municípios em análise.

Excluindo Alter do Chão, o Município de Campo Maior é o que apresenta uma menor Irradiação solar DNI ao longo do mês. Pelo contrário Marvão regista os valores mais elevados.

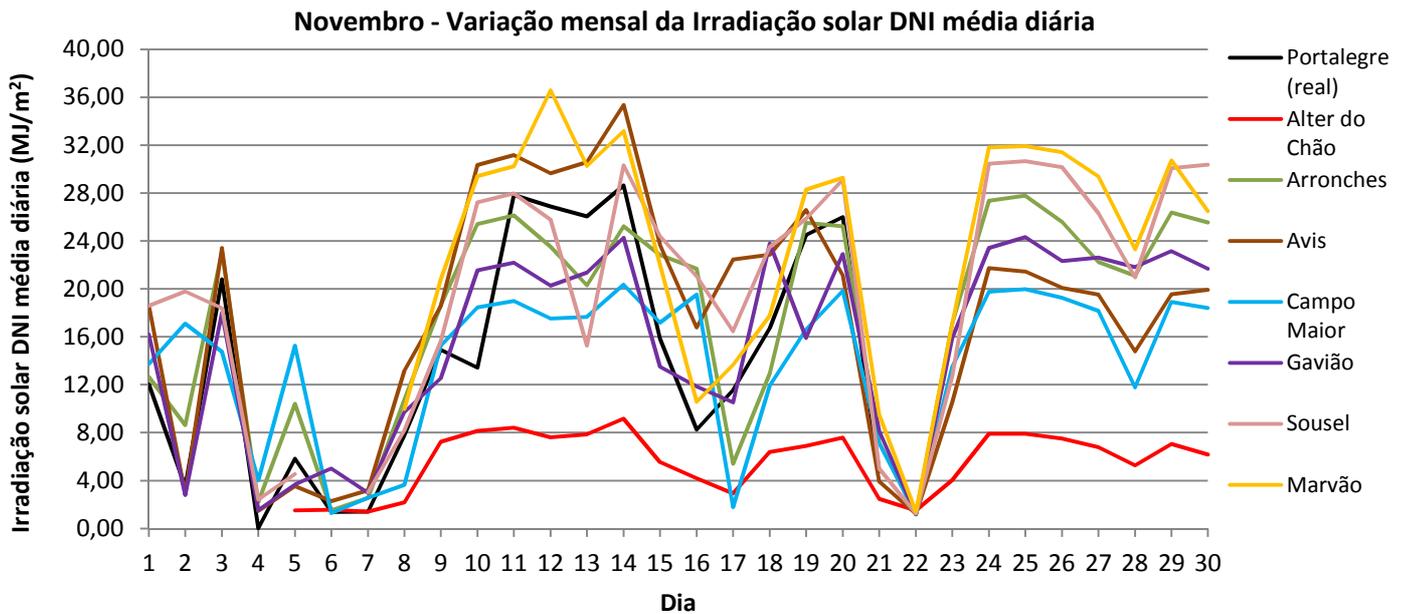


Figura 96 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar DNI média diária para o mês de Novembro.

A nível médio mensal (Figura 97) a Irradiação solar DNI oscilou entre os 13 MJ/m<sup>2</sup> e os 24 MJ/m<sup>2</sup>, dependendo do Município em questão. Relativamente ao mês anterior (Outubro) observa-se um aumento da Irradiação solar DNI, em alguns Municípios, que pode ser justificado com a diminuição da componente Difusa em relação ao mês de Outubro.

O Município de Campo Maior regista a média mensal mais baixa (13,85 MJ/m<sup>2</sup>) e o Município de Marvão a média mensal mais elevada (23,70 MJ/m<sup>2</sup>), sendo em termos globais a média no Alto Alentejo (exceto Alter do Chão) foi de 17,47 MJ/m<sup>2</sup>. Marvão tem a média mensal mais elevada porque nos primeiro cinco dias do mês não obteve registo de Radiação solar, período durante o qual a Radiação solar foi bastante reduzida.

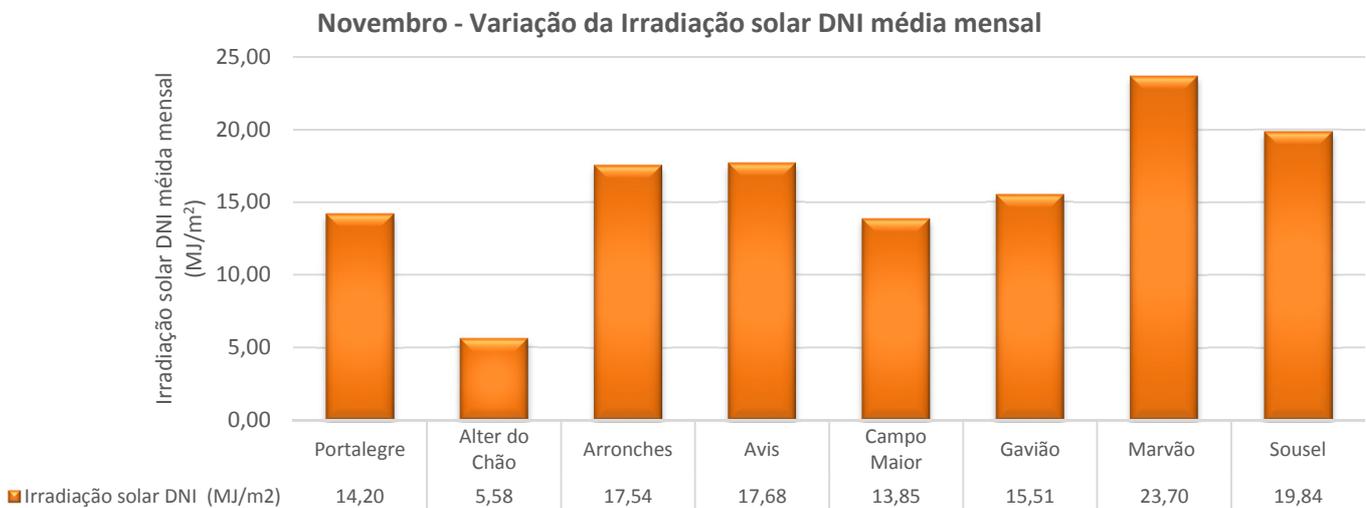


Figura 97 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar DNI para Novembro.

### 3.8.5 Dezembro

A Figura 98 ilustra a variação mensal da Irradiação solar DNI média diária em Dezembro, através da qual é possível concluir que a componente DNI oscilou entres os zero e os 32 MJ/m<sup>2</sup> ao longo do mês.

Através da observação da Figura 98 é possível verificar que os Município de Marvão e Sousel ao longo do mês apresentam os valores mais elevados de Irradiação solar DNI. A nível comportamental observa-se uma variação relativamente semelhante nos Municípios do Alto Alentejo analisados.

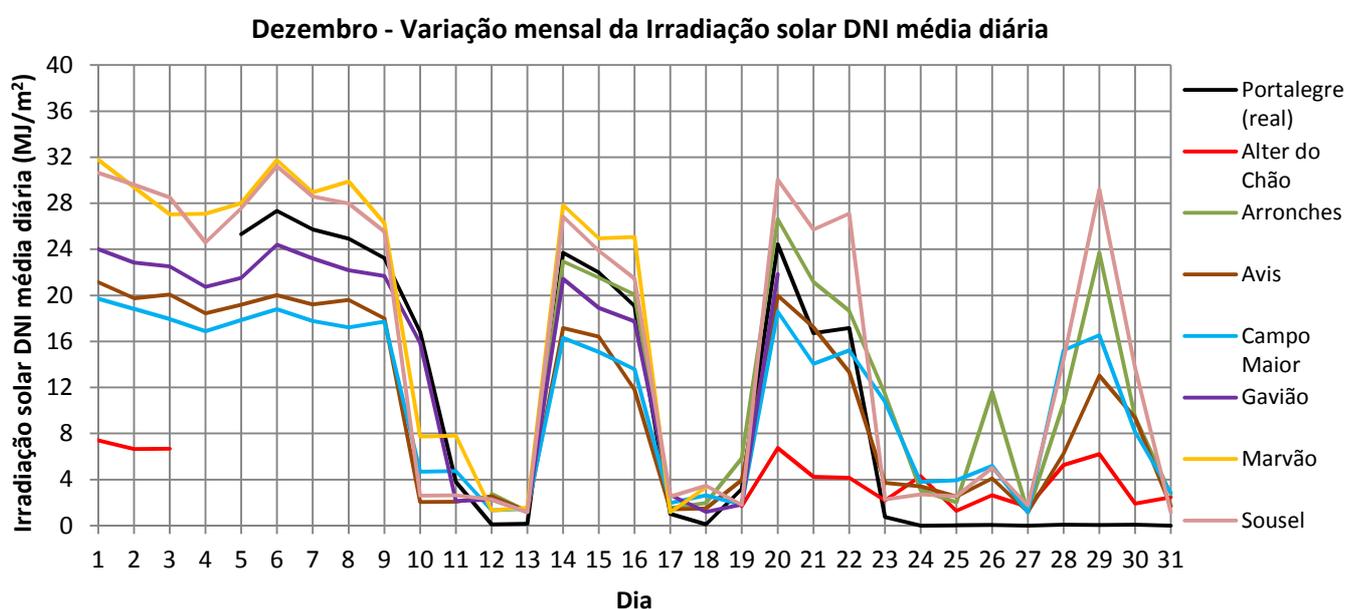


Figura 98 - Gráfico com a variação mensal da Irradiação solar DNI média diária para o mês de Novembro.

A nível médio mensal (Figura 99) a Irradiação solar DNI oscilou entre os 10 MJ/m<sup>2</sup> e os 16 MJ/m<sup>2</sup>, dependendo do Município em questão. Para além de Alter do Chão os Municípios de Marvão e Gavião também serão excluído desta análise mensal uma vez que não apresentam dados para os últimos dez dias do mês.

Relativamente ao mês anterior (Novembro) observa-se uma diminuição da Irradiação solar DNI devido ao agravamento das condições climáticas que afetam de forma negativa a quantidade de Energia captada por um determinada superfície no plano inclinado. A média mensal dos Municípios para Dezembro é de 13,31 MJ/m<sup>2</sup>.

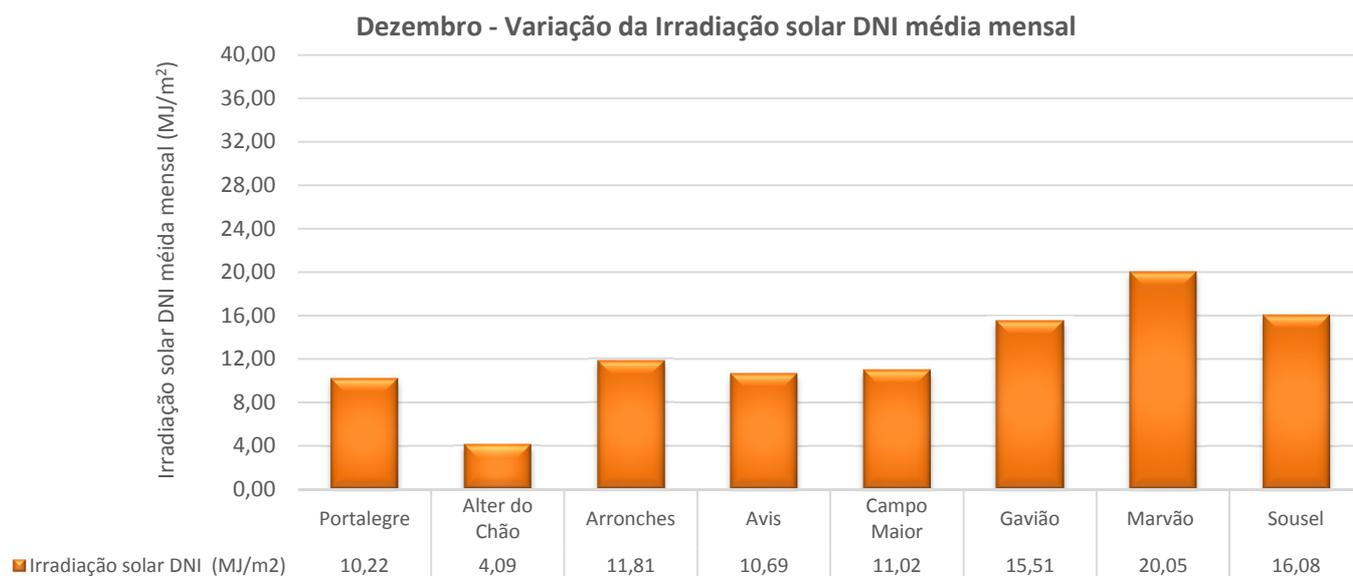


Figura 99 - Gráfico com a média mensal da Irradiação solar DNI para Dezembro.

### 3.8.6 Análise semestral

O presente subcapítulo consiste na análise semestral da Radiação solar DNI que corresponde ao período compreendido entre Agosto e Dezembro de 2013. Para esse fim foi determinada a média semestral da Irradiação solar DNI ( $\bar{H}_{\text{DNI-semestral}}$ ) através da seguinte equação:

$$\bar{H}_{\text{DNI-semestral}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{mês}}} \bar{H}_{\text{DNI-mensal}}}{n_{\text{mês}}} \quad [\text{MJ}/\text{m}^2] \quad 3.32$$

Em que  $n_{\text{mês}}$  corresponde ao número de meses para o qual é efetuada a análise.

Na Figura 100 estão representados os resultados obtidos a partir da equação 3.32 para a Irradiação solar DNI semestral. O Município de Marvão não está representado no gráfico uma vez que apenas existem dados para este Município desde Novembro.

Através da análise da Figura 100 pode-se concluir que de uma forma geral a Irradiação solar DNI variou entre os 16 MJ/m<sup>2</sup> e os 19 MJ/m<sup>2</sup>, à exceção de Alter do Chão, apresentando uma média semestral de todos os Municípios analisados na ordem dos 17,06 MJ/m<sup>2</sup>.

O Município de Portalegre de entre os vários do Alto Alentejo é o que apresenta uma maior média semestral de Irradiação solar DNI (18,67 MJ/m<sup>2</sup>) enquanto o Município de Campo Maior apresenta a menor média semestral de Irradiação solar DNI (16,09 MJ/m<sup>2</sup>).

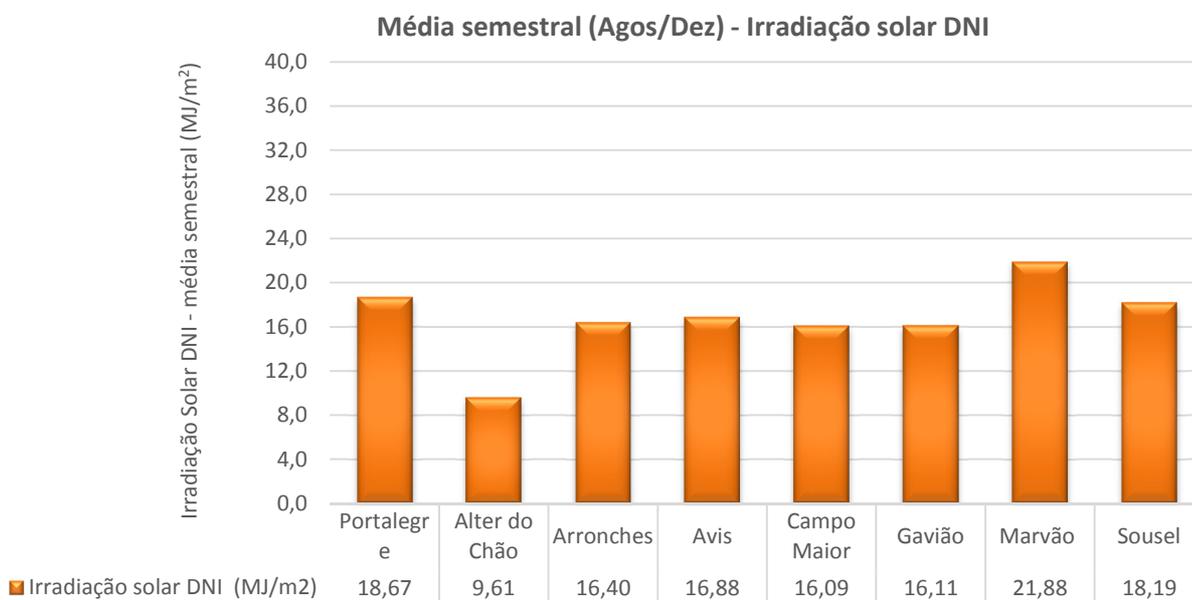


Figura 100 – Gráfico com a média semestral da Irradiação solar DNI para o Alto Alentejo.

Para a elaboração do mapa semestral da Irradiação solar DNI foram utilizados os resultados anteriores, bem como a cartografia do Alto Alentejo cedida gentilmente pela CIMAA em formato 'DWG' tendo sido utilizado o *Software 'Autocad'* como auxiliar. Para além disso utilizei o esquema de cores por classes definido anteriormente, de acordo com o nível de Irradiação solar.

No mapa da Figura 101 não consta o Município de Marvão por não apresentar dados para todo o período em análise, nem consta o Município de Alter do Chão devido à incorreta instalação da estação que impede retirar conclusões válidas.

Através da análise do mapa da Figura 101 é possível verificar que os Municípios de Portalegre e Sousel apresentam uma média semestral de Irradiação solar DNI entre os 18 a 20 MJ/m<sup>2</sup> enquanto os restantes Municípios apresentam uma média semestral de Irradiação solar DNI entre os 16 a 18 MJ/m<sup>2</sup>.

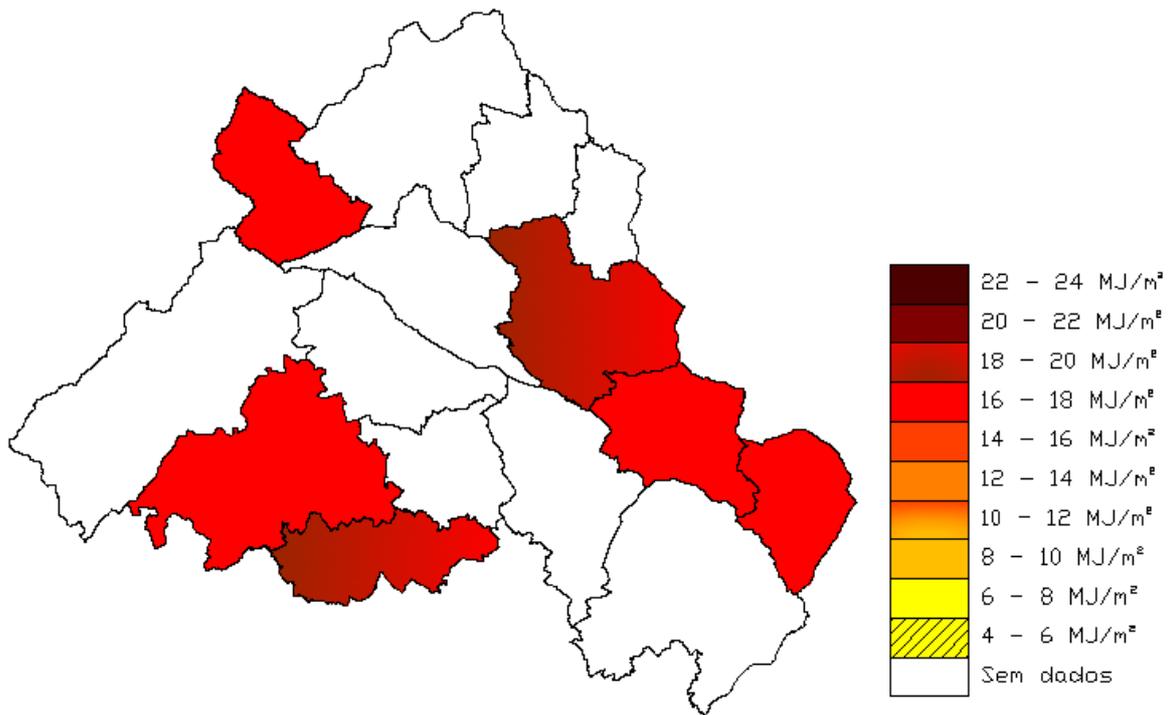


Figura 101 - Mapa com a média semestral da Irradiação solar DNI para o Alto Alentejo.

## 4 Projeto DNI

Para além do trabalho desenvolvido no âmbito do projeto RETALER II, também estive integrado noutra projeto que é complementar ao trabalho abordado ao longo da presente Dissertação de Mestrado.

Este projeto é referente à elaboração de uma candidatura à linha de financiamento do QREN, no âmbito do Eixo 1 – Competitividade, Inovação e Conhecimento referente ao Regulamento Específico: Promoção e Capacitação Institucional que tem por título ‘Mapeamento da Radiação solar direta normal (DNI) no Alentejo/ Definição dos locais de excelência para a instalação de centrais solares de alta concentração’.

A candidatura foi apresentada ao Inalentejo em Dezembro de 2013, tendo sido elaborada por mim contando com a colaboração dos parceiros envolvidos. À data da presente Dissertação aguarda-se por decisão de aprovação da candidatura por parte do Inalentejo. De seguida será apresentada a descrição referente à candidatura.

### 4.1 Fundamentação

A avaliação do recurso da Radiação solar DNI, objeto desta candidatura, é o ponto de partida essencial para o desenvolvimento da utilização da energia solar no futuro, nas muitas aplicações que necessitam de recorrer a tecnologias de concentração. Trata-se de dar início a uma escala geograficamente significativa, da avaliação do recurso.

Ora acontece que as aplicações da Energia solar recorrendo a coletores solares que normalmente não têm óticas concentradoras associadas, captam a Radiação solar dita Global, constituída pela soma da Radiação solar Direta com a Radiação solar Difusa. Esta Radiação encontra-se suficientemente medida em todo o nosso país. Contudo isso já não é verdade para a Radiação DNI (DNI- *Direct Normal Incidence*) que exige uma instrumentação dedicada mais complexa e cara. Até ao aparecimento das tecnologias de concentração isso não era uma limitação importante, mas no advento da introdução generalizada das novas tecnologias de concentração no mercado, esta lacuna de dados tem de ser colmatada.

São dois os aspetos que interessa poder cobrir, ou seja, iniciar a medida da Radiação solar DNI com uma cobertura geográfica significativa e poder a partir dos dados recolhidos, por um período curto, deduzir resultados com significado estatístico de períodos mais longos, para poder desde já utilizá-los em situações onde importe conhecer o comportamento a longo prazo dos sistemas solares.

A característica do recurso solar, com a componente aleatória que contem, exige que a medida se faça por um número longo de anos, francamente excedendo a duração do projeto. O facto de o projeto nascer associado à Universidade de Évora e aos demais parceiros, cuja presença na região é de longa duração, reúne desde logo as condições necessárias para que se possa pensar na extensão do período de medida e de análise de dados por muitos mais anos.

Acresce que o projeto tem um interesse científico significativo, para além da sua aplicação imediata no desenvolvimento do mercado solar de concentração. Esse interesse prende-se com o facto de a indisponibilidade deste tipo de informação ser geral em todo o mundo, e não só em Portugal. O que existe em todo lado é informação sobre número de horas de sol e Radiação solar Global.

Ora, no decurso do projeto, e na continuidade que se lhe dará para o futuro, será possível aprofundar e melhorar as correlações entre os tipos de Radiação solar, por forma a obter da informação que esteja disponível nos diferentes locais, uma estimativa com um rigor crescente do que será o valor expectável Radiação solar DNI e a sua variabilidade em qualquer desses locais.

Desenvolvimento de novos mapas de radiação, correção dos dados atualmente disponíveis baseados em observação satélite, etc. são temas que exigem uma abordagem científica, altamente especializada e precisamente ao alcance e no âmbito dos temas que a Universidade de Évora (CGE + Cátedra BES-ER) querem desenvolver.

## 4.2 Objetivos específicos do Projeto

O presente projeto é baseado na capacidade instalada e já existente, em termos dos investigadores e do equipamento adquirido e/ou desenvolvido, na avaliação e previsão dos recursos ambientais e da sua evolução do CGE (Centro de Geofísica de Évora), da Cátedra BES-ER (Universidade de Évora), AREANATEjo, Lógica EMSA, INEGI, ENERCOUTIM e Integrum Martim Longo - Energia. Esta avaliação e previsão dos recursos ambientais, que incluem: a avaliação e previsão da Radiação solar Direta, Global e Difusa, baseada sobretudo em técnicas de monitorização de deteção remota de superfície e de satélite e em modelação, abrange múltiplas escalas espaciais (local, regional e global) e temporais (instantânea, diária, sazonal e anual). Este estudo é fundamental e estritamente necessário para potenciar o desenvolvimento no sentido de melhor interatuar com o tecido regional empresarial e institucional, em particular no sector energético (por exemplo produção, geração e distribuição de Energia solar termoelétrica) e no sector ambiental.

O projeto permite que outras empresas sediadas na região, de índole nacional ou internacional tenham acesso a tecnologias de avaliação/monitorização e de modelação, que serão únicas no país, com aplicação dos resultados a diversos sectores de atividade empresarial e de serviços, é de prever não só um contributo à competitividade regional como à economia nacional.

O objetivo de fundo é medir e caracterizar a Radiação solar DNI no Alentejo, para:

- O aproveitamento de recursos ambientais (Energia solar térmica e fotovoltaica, com recurso a tecnologias de concentração);
- E caracterização e avaliação dos recursos para o dimensionamento, financiamento e instalação de centrais de concentração, de pequena, média e grande dimensão.

De seguida listam-se os seguintes objetivos específicos:

- Aquisição de novo equipamento e montagem de duas novas estações meteorológicas;
- Arranque, operação e manutenção de todas as instalações incluindo as recentemente instaladas/adquiridas, existentes e valorização eventual das mesmas;

- Análise e tratamento dos dados recolhidos;
- Elaboração de séries temporais e cálculos dos primeiros valores médios;
- Comparação com os dados de Radiação Global e obtenção das primeiras correlações com esta informação;
- Promoção e Divulgação dos resultados obtidos.

### **4.3 Pertinência da sua realização**

Um desenvolvimento deste tópico exige condições naturais que são as que se encontram no Alentejo. Os concentradores exigem Radiação solar DNI que não abunda nos países do Centro e Norte da Europa, onde tem ocorrido o forte desenvolvimento europeu nas tecnologias mais convencionais e que não exigem concentração. Precisamente, quando a indústria desses países pretende evoluir para as tecnologias de concentração de futuro, olha para os países do sul da Europa, não só como utilizadores privilegiados, mas como essenciais no desenvolvimento, já que têm as condições ideais para se realizarem as demonstrações, os ensaios e as certificações.

Évora oferece condições ideais, não só porque tem a requerida Radiação solar DNI em abundância e está no centro da região, mas também pela sua Universidade que para além de oferecer uma série de competências relevantes e experiência (ao nível do GCE e outros departamentos) tem-nas agora completadas de forma explícita com a Cátedra BES - ER e com a sua Licenciatura em Engenharia das Energias Renováveis, o seu Mestrado em Engenharia da Energia Solar e num futuro próximo o Mestrado Internacional em Energias Renováveis e Doutoramento.

O presente projeto pretende congrega nas novas infraestruturas que se substanciam nesta proposta, todas estas valências, tanto mais que, nos últimos meses tem havido desenvolvimentos importantes que confirmam as expectativas e a perceção de que existe um verdadeiro “nicho” de atividade e de mercado a ocupar através destes projetos no Alentejo.

## 5 Conclusões

O propósito do trabalho desenvolvido nestes dois projetos vem de encontro às necessidades mundiais de encontrar alternativas aos combustíveis fósseis e aproveitar os recursos endógenos que neste caso específico o nosso país usufrui, nomeadamente um elevado índice de Radiação solar ao longo de todo o ano, especialmente na região Alentejo.

O trabalho desenvolvido no âmbito do Projeto RETALER II consistiu na instalação de oito estações meteorológicas que permitem a obtenção de dados de Radiação solar, que posteriormente foram tratados e analisados ao longo da presente Dissertação com o objetivo de estudar e desenvolver novas correlações que permitam estimar as várias componentes da Radiação solar e efetuar o mapeamento solar desses mesmos locais.

Dessa análise foi possível concluir que a Radiação solar é bastante imprevisível, inconstante e que depende de diversos fatores meteorológicos como por exemplo a precipitação, índice de nuvens no céu, aerossóis e gases suspensos na atmosfera.

Este projeto é recente tendo sido iniciado em Junho de 2013 com a finalidade de efetuar o mapeamento solar do Alto Alentejo. Um estudo desta natureza requer a recolha contínua de dados por um período mínimo entre um a dois anos, pelo que o projeto durará pelo menos até Agosto de 2014.

Os dados medidos até à data apresentam várias lacunas em todos os Municípios onde foram instaladas as estações, devido a erros de leitura, falta de bateria dos equipamentos entre outros problemas imprevisíveis, que a juntar à incorreta instalação de algumas das estações meteorológicas conduziram a uma dificuldade acrescida na análise das várias componentes da Radiação solar e conseqüentemente a uma redução do significado estatístico associado a essa análise.

Contudo o presente estudo revelou-se bastante enriquecedor e permitiu efetuar a análise e o mapeamento solar de 8 Municípios do Alto Alentejo para o período compreendido entre Agosto e Dezembro de 2013. Deste estudo retira-se a conclusão que o Município de Sousel é o que apresenta um maior índice de Radiação solar no período em que foi possível registar dados, enquanto Gavião apresenta o menor índice de Radiação solar, ainda que essa diferença não seja muito acentuada. Para esta

conclusão foram excluídos os Municípios de Marvão, Portalegre e Alter do Chão. Por outro lado verifica-se que o índice de Radiação solar incidente em Évora é bastante semelhante ao registado nos Municípios do Alto Alentejo em igual período.

Em suma efetuou-se o estudo de correlações já desenvolvidas e deu-se início ao estudo e desenvolvimento de novas correlações que permitam estimar as várias componentes da Radiação solar no Alentejo. Contudo estas correlações devem ser trabalhadas e revistas para uma maior base de dados de forma a aumentar o seu valor estatístico e diminuir o erro associados às estimativas com o objetivo de serem empregues para efetuar a extrapolação da Radiação solar para outras regiões.

O projeto DNI surge como complemento do projeto anterior e permitirá efetuar o desenvolvimento das correlações mencionadas anteriormente, contudo encontra-se em fase embrionária ainda que tenha uma elevada expectativa de sucesso devido à grande concentração de competências que possui.

De um ponto de vista mais alargado esta candidatura surge como uma necessidade a nível Mundial de quantificar e desenvolver correlações para quantificar a Radiação solar DNI, com o objetivo final dos resultados serem utilizados para a elaboração de projetos de produção de energia através de tecnologias de concentração solar.

Este projeto adquire um papel fundamental no desenvolvimento da região e até mesmo do setor da energia solar uma vez que funcionará como catalisador, agregador de competências e prova de que o Alentejo poderá ser o centro de expansão e aproveitamento da Energia solar, já que para além de dispor de um dos mais elevados índices de Radiação solar Mundial, dispõe também das competências técnicas e científicas mais qualificadas.

## 6 Referências Bibliográficas

- [1] “World total primary energy consumption by region, Reference case,” Abril 2013. [Online]. Available: <http://www.eia.gov/oiaf/aeo/tablebrowser/#release=IEO2013&subject=0-IEO2013&table=1-IEO2013&region=0-0&cases=Reference-d041117>. [Acedido em 13 Janeiro 2014].
- [2] D. o. E. a. S. Affairs, “World Population Prospects - The 2012 Revision,” United Nations, New York, 2013.
- [3] C. J. Chen, Physics of Solar Energy, John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [4] “Radiação Solar Incidente,” [Online]. Available: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-7.html>. [Acedido em 14 Janeiro 2014].
- [5] E. B. M. R. F. M. D. Camacho, Control of Solar Energy Systems, Springer-Verlag London Limited, 2012.
- [6] S. Kalogirou, Solar energy engineering : processes and systems, California : Elsevier's Science & Technology, 2009.
- [7] M. Collares Pereira e A. Rabl, “The average distribution of solar radiation - correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values,” *Solar Energy*, 1979.
- [8] A. Rabl, Active solar collectors and their applications, New York: Oxford University Press, 1985.
- [9] ASHRAE, Procedure for Determining Heating and Cooling Loads for Computerizing Energy Calculations, Atlanta: ASHRAE, 1975.
- [10] F. Kreith e J. Kreider, Principles of Solar Engineering, New York: McGraw-Hill, 1978.
- [11] M. Collares Pereira e M. J. Carvalho, Dimensionamento de sistemas solares - Sistema de aquecimento de água com armazenamento acoplado, Lisboa: LNEG, 1990.
- [12] Kipp & Zonen, Product catalogue - Solar instruments, Atmospheric Science instruments and Wind sensors, 2009.
- [13] Kipp & Zonen, “Kipp & Zonen,” [Online]. Available: [http://www.kippzonen.com/data/uploads/product/01\\_Pyranometers\\_03\\_CMP\\_3\\_01\\_CMP\\_3\\_.jpg](http://www.kippzonen.com/data/uploads/product/01_Pyranometers_03_CMP_3_01_CMP_3_.jpg). [Acedido em 22 Janeiro 2014].
- [14] Kipp & Zonen, Instruction manual - CMP series Pyranometer; CMA series Albedometer, Delftechpark: Kipp & Zonen, 2014.
- [15] Kipp & Zonen, Instruction manual - Solys 2 - 2 Axis sun tracker, Delftechpark: Kipp & Zonen, 2011.
- [16] Kipp & Zonen, “Kipp & Zonen,” [Online]. Available: <http://www.kippzonen.com/Product/18/CHP-1-Pyrheliometer#.UuELdbSp3IX>. [Acedido em 23 Janeiro 2014].
- [17] K. Scharmer e J. Greif, The European solar Radiation Atlas, Paris, 2000.
- [18] Kipp & Zonen, “Kipp & Zonen,” [Online]. Available: <http://www.kippzonen.com/Product/35/CSD-3-Sunshine-Duration-Sensor#.UuEtWbSp3IU>. [Acedido em 23 Janeiro 2014].
- [19] S. Burt, The Weather Observer's Handbook, Cambridge University Press.

- [20] I. Strangeways, *Measuring the Natural Environment*, Cambridge University Press.
- [21] K. Ulgen e A. Hepbasli, "Diffuse solar radiation estimation models for Turkey's big cities," *Elsevier*, 2008.
- [22] A. A. M. Sayigh, *Solar Energy Engineering*, Orlando, Florida: Academic Press, INC., Ltd, 1977.
- [23] D. Ruth e R. Chant, "The relationship of diffuse radiation to total radiation in Canada," *Solar Energy*, vol. 18, nº 2, pp. 153-154, 1976.
- [24] M. Collares Pereira e A. Rabl, "Correlations for Diffuse solar radiation," *Systems simulation and economic analysis for solar heating and cooling*, 1978.
- [25] K. S. D. J. Erbs DG, "Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation.," *Solar Energy*, vol. 28:, pp. 293-302, 1982.
- [26] W. A. B. JOHN A. DUFFIE, *SOLAR ENGINEERING OF THERMAL PROCESSES*, New York: JOHN WILEY & SONS, INC..
- [27] CIMAA, "CIMAA," [Online]. Available: <http://www.cimaa.pt/>. [Acedido em 20 Setembro 2013].
- [28] J. Page, "The estimation of monthly mean values of daily total short-wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40\_N-40\_S," *Proceedings of UN conference on new sources of energy*, vol. 4.
- [29] S. E. Tuller, "The relationship between diffuse, total and extraterrestrial solar radiation," *Solar Energy*, 1976.
- [30] M. Iqbal, "A study of Canadian diffuse and total solar radiation data. I. Monthly average daily horizontal radiation.," *Solar Energy*, 1979.
- [31] C. G. C. S. L. C. S. E. Barbaro S, "Diffuse solar radiation statistics for Italy," *Solar Energy*, 1981.
- [32] J. PC, "A model for diffuse and global irradiation on horizontal surfaces," *Solar Energy*, 1990.
- [33] H. a. B. J. Nfaoui, "Estimation of daily and monthly direct, diffuse and global solar radiation in Rabat (Morocco)," *Renew. Energy*, 1993.
- [34] C. P. H. L. P. S. a. S. L. Jacovides, "On the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for the island of Cyprus.," *Solar Energy* , vol. 56, pp. 565-572., 1996.
- [35] A. Kaygusuz K, " Analysis of solar radiation data for Trabzon, Turkey," *Energy Convers Manage*, vol. 40, 1999.
- [36] B. O. H. A. Haydar A, " Global solar radiation potential, Part 2: Statistical analysis.," *Energy sources*, 2006.
- [37] k. Barkirci, "The Calculation of Diffuse Radiation on a Horizontal Surface for Solar Energy Applications, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects," *Taylor & Francis*, Vols. %1 de %234:10, 889-892., 2012.
- [38] A.-N. D. Elhadidy MA, "Diffuse fraction of daily global radiation at Dhahran, Saudi Arabia.," *Solar Energy*, Vols. %1 de %246(2):89-95., 1991.
- [39] S. A. Tarhan S, "Model selection for global and diffuse radiation over the Central Black Sea (CBS) region of Turkey.," *Energy Convers Manage* , Vols. %1 de %246:605-13., 2005.
- [40] S. A. Klein, "Calculation of monthly average insolation on titled surfaces.," *Solar Energy*, vol. 19, pp. 325-329, 1977.
- [41] M. T. C. a. T. I. Tiris, "Correlations of monthly-average daily global, diffuse and beam radiations with hours of bright sunshine in Gebze, Turkey," *Energy Convers. Manage*, vol. 37, pp. 1417-1421, 1996.

- [42] K. a. H. A. Ulgen, "Comparison of the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for Izmir, Turkey.," *Energy Sources* , vol. 25, pp. 637-649, 2003. .
- [43] E. a. S. R. Tasdemiroglu, "Estimation of monthly average, daily, horizontal diffuse radiation in Turkey.," *Energy* , vol. 16, pp. 787-790., 1991.
- [44] K. S. A. a. D. J. A. Erbs D. G., "Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation.," *Solar Energy*, vol. 28, 1982.