



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Desenvolvimento de um algoritmo de previsão de radiação solar através do refinamento espacial e temporal de dados de previsão meteorológica

Sara Raquel Alves Pereira

Orientação: Professor Doutor Paulo Canhoto

Professor Doutor Rui Salgado

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Évora, 2017

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Desenvolvimento de um algoritmo de previsão de radiação solar através do refinamento espacial e temporal de dados de previsão meteorológica

Sara Raquel Alves Pereira

Orientação: Professor Doutor Paulo Canhoto

Professor Doutor Rui Salgado

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Évora, 2017

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu agradecimento a todos os que direta ou indiretamente apoiaram ou contribuíram para a elaboração desta dissertação.

Em particular quero agradecer ao meu orientador Professor Doutor Paulo Manuel Ferrão Canhoto que sempre se mostrou disponível para ajudar e por todo o tempo despendido, paciência e contribuição essencial para esta dissertação. Ao Professor Doutor Rui Salgado, que aceitou o desafio de me coorientar, agradeço a disponibilidade para me acompanhar neste percurso e toda a ajuda prestada.

À Professora Doutora Maria João e ao Engenheiro André Albino agradeço os importantes esclarecimentos. Agradeço também aos meus colegas de gabinete por toda a ajuda prestada e aos meus amigos e colegas da Universidade de Évora pela partilha de conhecimentos, pela amizade e pelo companheirismo ao longo destes anos.

Gostaria ainda de agradecer aos meus pais, Filipe Pereira e Carmen Pereira, por toda a força e motivação e por todo o esforço e sacrifício que tornaram possível a realização deste curso, assim como à minha restante família pelo apoio e encorajamento.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do contrato de prestação de serviços da Universidade de Évora com a empresa Warmhole, Lda pelo que estendo os meus agradecimentos a ambas instituições.

Resumo

Esta dissertação apresenta um estudo detalhado dos dados de previsão de radiação solar global num plano horizontal obtidos pelo modelo do ECMWF, através da comparação com medições em Évora e Sines. Foram desenvolvidas técnicas de *downscaling* espacial e temporal dos valores de previsão e estabelecidas relações para a dependência da diferença entre previsões e medições em função de outras variáveis meteorológicas e parâmetros associados à geometria Terra-Sol. As diferenças médias diárias observadas foram da ordem de $-1,02 \pm 3,56\%$ para Évora e $2,27 \pm 5,10\%$ para Sines em condições de céu limpo no período considerado (2015-2016). Realizou-se também um estudo de vários modelos de radiação solar em condições de céu limpo com o objetivo de gerar dados em caso de falha do modelo global, e foi desenvolvida uma primeira versão de um algoritmo de previsão de radiação solar global para integração num sistema de gestão de energia em instalações de energia solar.

Palavras-chave: Energia solar; Radiação solar; Modelos de previsão; Previsão do tempo a médio prazo; *Downscaling*.

Abstract

Development of a solar radiation prediction algorithm through spatial and temporal downscaling of weather forecast data

This dissertation consists in a detailed study of the predicted solar global irradiation data on a horizontal surface from the ECMWF model, by comparison with measurement data in Évora and Sines. Spatial and temporal downscaling techniques of prediction data were developed, as well as a study on the dependence of the differences between predicted and measured values with other meteorological and Sun-Earth geometry related variables. The mean daily differences were found within $-1,02 \pm 3,56\%$ in Évora and $-2,27\% \pm 5,10\%$ in Sines in clear sky conditions and for the selected period (2015-2016). A study of several solar radiation clear-sky models was also carried out being its goal to generate data in the event of failures in the ECMWF's model data, and a first version of a solar radiation prediction algorithm was developed to be implemented in an optimized energy management system of solar energy systems.

Keywords: Solar energy; Solar radiation; Forecast models; Medium-range forecast; Downscaling.

Índice

Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas.....	xxiii
Nomenclatura.....	xxv
Letras e Símbolos	xxv
Siglas e Acrónimos.....	xxvii
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos	7
1.2. Organização da dissertação	8
2. Modelação da radiação solar	9
2.1. Geometria Terra-Sol e hora solar.....	9
2.1.1. Dia do ano	9
2.1.2. Declinação solar	9
2.1.3. Tempo solar aparente e tempo legal local.....	9
2.1.4. Ângulo horário.....	10
2.1.5. Ângulo solar zenital	10
2.1.6. Horas de nascer e pôr do Sol.....	10
2.1.7. Fração da duração do dia	10
2.1.8. Irradiação solar no topo da atmosfera.....	11
2.1.9. Índice de claridade	11
2.2. Modelos de radiação solar em condições de céu limpo	11
2.2.1. Modelo de Fu e Rich.....	11
2.2.2. Modelo HLJ.....	12
2.2.3. Modelo ASHRAE	13
2.2.4. Modelo SMARTS.....	14
2.3. Previsão da radiação solar - ECMWF.....	16
3. Recolha e tratamento de dados.....	21
3.1. Recolha e tratamento de dados de previsão do ECMWF	21
3.2. Recolha e tratamento de dados de medição em Évora e Sines.....	23
4. Métodos de reescalamento dos dados de previsão e de cálculo de desvios	27
4.1. Downscaling temporal	27
4.1.1. Downscaling temporal da irradiação solar global	27

4.1.2.	Downscaling temporal da temperatura média do ar	30
4.2.	Downscaling espacial	30
4.2.1.	Pontos da grelha de previsão	30
4.2.2.	Média aritmética	31
4.2.3.	Interpolação linear dupla	31
4.2.4.	Ponderação pelo inverso da distância.....	32
4.3.	Cálculos das diferenças	33
5.	Análise de dados	35
5.1.	Comparação preliminar entre previsões e medições	35
5.2.	Análise espacial e ao longo de 3 dias de previsão em dias de céu limpo	40
5.3.	Influência da posição aparente do Sol e das variáveis atmosféricas	44
5.3.1.	Índice de claridade	45
5.3.2.	Índice de claridade e ângulo solar zenital	48
5.3.3.	Índice de claridade e fração da duração do dia	53
5.3.4.	Temperatura média do ar	57
5.3.5.	Humidade relativa do ar.....	60
5.3.6.	Coluna de água.....	62
6.	Análise de modelos simples de céu limpo	65
6.1.	Modelo de Fu e Rich.....	65
6.2.	Modelo HLJ.....	67
6.3.	Modelo ASHRAE	69
6.4.	Modelo SMARTS.....	71
6.5.	Comparação entre modelos.....	72
7.	Desenvolvimento de um algoritmo de previsão	75
7.1.	Valores de entrada do algoritmo	75
7.2.	Características do algoritmo	75
7.3.	Formato de dados de saída do algoritmo	77
8.	Conclusão	79
	Referências.....	81
	Glossário.....	87
	Anexo I - Ficheiro de exemplo de input do modelo SMARTS.....	91
	Anexo II - Ficheiro de exemplo de output do modelo SMARTS	93
	Anexo III - Script para recolha dos dados do ECMWF	97

Anexo IV -	Exemplo de script para concatenação de ficheiros NetCDF	99
Anexo V -	Impacto da utilização dos dados de previsão ou medição no cálculo do índice de claridade nas diferenças.....	101
Anexo VI -	Análise da dependência das diferenças com variáveis meteorológicas	103
VI.1.	Temperatura média do ar	103
VI.2.	Humidade relativa do ar.....	104
VI.3.	Intensidade do vento	105
VI.4.	Nebulosidade	107
VI.5.	Altura da base das nuvens	109
VI.6.	Coluna de água.....	111
VI.7.	Coluna de ozono.....	112
VI.8.	Visibilidade	114
Anexo VII -	Código de base em MATLAB utilizado.....	117
Anexo VIII -	Exemplo de ficheiro de saída do algoritmo.....	127

Índice de Figuras

Figura 3.1 – Localização dos 4 pontos da grelha de previsão mais próximos do local de medições e do local de medições em Évora.....	24
Figura 3.2 – Localização dos 4 pontos da grelha de previsão mais próximos do local de medições e do local de medições em Sines.	25
Figura 3.3 – Dados de medição de 1 a 7 de julho de 2016 em Évora. a) Dados de irradiação solar global obtidos através da integração dos dados de irradiância medidos pelo sensor de 1 em 1 minuto; b) Dados de medição de irradiação solar global de meia em meia hora com correção do zero-offset; c) Dados de medição de irradiação solar global horários com correção do zero-offset.	26
Figura 4.1 – Esquema utilizado para a realização do <i>downscaling</i> temporal da irradiação solar global.	27
Figura 4.2 – Esquema da hora de nascer do Sol utilizado para a realização do <i>downscaling</i> temporal da irradiação solar global.	28
Figura 4.3 – Esquema da hora de pôr do Sol utilizado para a realização do <i>downscaling</i> temporal da irradiação solar global.	29
Figura 4.4 – Esquema utilizado para a realização do <i>downscaling</i> temporal da temperatura média do ar.	30
Figura 4.5 – Esquema da grelha de previsão do modelo do ECMWF. A vermelho: local de interesse. A amarelo: pontos vizinhos do local de interesse. A verde: pontos seguintes aos mais próximos..	31
Figura 5.1 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu limpo em Évora para as 24 horas iniciais da previsão. (Densidade de pontos [%]. Número total de pontos:2798)..	35
Figura 5.2 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu limpo em Évora para as segundas 24 horas da previsão. (Densidade de pontos [%]. Número total de pontos:2802).	36
Figura 5.3 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu limpo em Évora para as terceiras 24 horas da previsão. (Densidade de pontos [%]. Número total de pontos:2675).	36
Figura 5.4 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu limpo em Sines para as primeiras 24 horas da previsão. (Densidade de pontos [%]. Número total de pontos: 907).....	37
Figura 5.5 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu limpo em Sines para as segundas 24 horas da previsão. (Densidade de pontos [%]. Número total de pontos: 873).	37
Figura 5.6 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu limpo em Sines para as terceiras 24 horas da previsão. (Densidade de pontos [%]. Número total de pontos: 830).	38
Figura 5.7 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu parcialmente nublado em Évora para as primeiras 24 horas de previsão. (Densidade de Pontos [%]. Número total de pontos:2919).	38
Figura 5.8 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu muito nublado em Évora para as primeiras 24 horas de previsão. (Densidade de Pontos [%]. Número total de pontos: 900).	39
Figura 5.9 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu parcialmente nublado em Sines para as primeiras 24 horas de previsão. (Densidade de Pontos [%]. Número total de pontos: 3773).	39

Figura 5.10 – Comparação entre previsão e medição em condições de céu muito nublado em Sines para as primeiras 24 horas de previsão. (Densidade de Pontos [%]. Número total de pontos: 780).	40
Figura 5.11 – Média das diferenças relativas diárias entre a previsão para cada ponto e calculada através de <i>downscaling</i> espacial e a medição, em condições de céu limpo, em função do dia de previsão em Évora.....	41
Figura 5.12 – Média das diferenças relativas diárias entre a previsão para cada ponto e calculada através de <i>downscaling</i> espacial e a medição, em condições de céu limpo, em função do dia de previsão em Sines.....	41
Figura 5.13 – Média das diferenças relativas diárias entre a previsão para cada ponto e calculada através de <i>downscaling</i> espacial e a medição em função do dia de previsão inserido num grupo de 5 dias seguidos de céu limpo em Évora.	42
Figura 5.14 – Média das diferenças relativas diárias entre a previsão para cada ponto e calculada através de <i>downscaling</i> espacial e a medição, em condições de céu limpo, em função do dia de previsão em Évora (4 pontos seguintes aos circundantes).....	43
Figura 5.15 – Média das diferenças relativas diárias entre a previsão para cada ponto e calculada através de <i>downscaling</i> espacial e a medição, em condições de céu limpo, em função do dia de previsão em Sines (4 pontos seguintes aos circundantes).....	43
Figura 5.16 – Média das diferenças relativas diárias entre a previsão calculada através de <i>downscaling</i> espacial para os 16 pontos circundantes ao local de medições, em condições de céu limpo, em função do dia de previsão em Évora.....	44
Figura 5.17 – Média das diferenças relativas diárias entre a previsão calculada através de <i>downscaling</i> espacial para os 16 pontos circundantes ao local de medições, em condições de céu limpo, em função do dia de previsão em Sines.....	44
Figura 5.18 – Diagrama de caixa, valores médios e sua linha de tendência dos dados de diferença relativa horária (calculados através de interpolação linear dupla) para cada classe de índice de claridade calculado com as medições em Évora.....	45
Figura 5.19 – Diagrama de caixa, valores médios e sua linha de tendência dos dados de diferença relativa horária (calculados através de interpolação linear dupla) para cada classe de índice de claridade calculado com as medições em Sines.....	46
Figura 5.20 – Média e diferença entre as diferenças relativas horárias e de meia em meia hora entre previsão (calculada através de interpolação linear dupla) e medições para cada classe de índice de claridade calculado com as medições em Évora.....	46
Figura 5.21 – Média e diferença entre as diferenças relativas horárias e de meia em meia hora entre previsão (calculada através de interpolação linear dupla) e medições para cada classe de índice de claridade calculado com as medições em Sines.....	47
Figura 5.22 – Diagrama de caixa, valores médios e sua linha de tendência dos dados de diferença em J/m^2 de meia em meia hora para cada classe de índice de claridade calculado com as previsões obtidas através de <i>downscaling</i> por interpolação linear dupla em Évora.....	47
Figura 5.23 – Diagrama de caixa, valores médios e sua linha de tendência dos dados de diferença em J/m^2 de meia em meia hora para cada classe de índice de claridade calculado com as previsões obtidas através de <i>downscaling</i> por interpolação linear dupla em Sines.....	48

Figura 5.24 – Diferenças relativas horárias [%] entre previsão (calculada através do <i>downscaling</i> espacial por interpolação linear dupla) e medições em função do ângulo solar zenital e do índice de claridade calculado com as medições para Évora.....	49
Figura 5.25 – Diferenças relativas horárias [%] entre previsão (calculada através do <i>downscaling</i> espacial por interpolação linear dupla) e medições em função do ângulo solar zenital e do índice de claridade calculado com as medições para Sines.	49
Figura 5.26 – Diferenças de meia em meia hora [J/m^2] entre previsão (calculada através do <i>downscaling</i> espacial por interpolação linear dupla) e medições em função do ângulo solar zenital e do índice de claridade calculado com os valores de previsão para Évora.	50
Figura 5.27 – Diferenças de meia em meia hora [J/m^2] entre previsão (calculada através do <i>downscaling</i> espacial por interpolação linear dupla) e medições em função do ângulo solar zenital e do índice de claridade calculado com os valores de previsão para Sines.....	50
Figura 5.28 – Média das diferenças relativas horárias [%] para cada classe de ângulo solar zenital e índice de claridade calculado com as medições em Évora.	51
Figura 5.29 – Desvio padrão da média das diferenças relativas horárias [%] para cada classe de ângulo solar zenital e índice de claridade calculado com as medições em Évora.	51
Figura 5.30 – Média das diferenças relativas horárias [%] para cada classe de ângulo solar zenital e índice de claridade calculado com as medições em Sines.	52
Figura 5.31 – Desvio padrão da média das diferenças relativas horárias [%] para cada classe de ângulo solar zenital e índice de claridade calculado com as medições em Sines.....	52
Figura 5.32 – Média das diferenças de meia em meia hora [J/m^2] para cada classe de ângulo solar zenital e índice de claridade calculado com base na previsão para Évora.	52
Figura 5.33 – Desvio padrão da média das diferenças de meia em meia hora [J/m^2] para cada classe de ângulo solar zenital e índice de claridade calculado com base na previsão para Évora.....	52
Figura 5.34 – Média das diferenças de meia em meia hora [J/m^2] para cada classe de ângulo solar zenital e índice de claridade calculado com base na previsão para Sines.	53
Figura 5.35 – Desvio padrão da média das diferenças de meia em meia hora [J/m^2] para cada classe de ângulo solar zenital e índice de claridade calculado com base na previsão para Sines.	53
Figura 5.36 – Diferenças relativas horárias [%] entre previsão (calculada através do <i>downscaling</i> espacial por interpolação linear dupla) e medições em função da fração da duração do dia e do índice de claridade calculado com base nas medições em Évora.....	54
Figura 5.37 – Diferenças relativas horárias [%] entre previsão (calculada através do <i>downscaling</i> espacial por interpolação linear dupla) e medições em função da fração da duração do dia e do índice de claridade calculado com base nas medições em Sines.	54
Figura 5.38 – Diferenças de meia em meia hora [J/m^2] entre previsão (calculada através do <i>downscaling</i> espacial por interpolação linear dupla) e medições em função da fração da duração do dia e do índice de claridade calculado com base na previsão para Évora.	55
Figura 5.39 – Diferenças de meia em meia hora [J/m^2] entre previsão (calculada através do <i>downscaling</i> espacial por interpolação linear dupla) e medições em função da fração da duração do dia e do índice de claridade calculado com base na previsão para Sines.....	55
Figura 5.40 – Média das diferenças relativas horárias [%] para cada classe de fração da duração do dia e índice de claridade calculado com base nas medições em Évora.	56
Figura 5.41 – Desvio padrão da média das diferenças relativas horárias [%] para cada classe de fração da duração do dia e índice de claridade calculado com base nas medições em Évora.....	56

Figura 5.42 – Média das diferenças relativas horárias [%] para cada classe de fração da duração do dia e índice de claridade calculado com base nas medições em Sines.....	56
Figura 5.43 – Desvio padrão da média das diferenças relativas horárias [%] para cada classe de fração da duração do dia e índice de claridade calculado com base nas medições em Sines.....	56
Figura 5.44 – Média das diferenças de meia em meia hora [J/m^2] para cada classe de fração da duração do dia e índice de claridade calculado com base nas previsões em Évora.....	57
Figura 5.45 – Desvio padrão da média das diferenças de meia em meia hora [J/m^2] para cada classe de fração da duração do dia e índice de claridade calculado com base nas previsões em Évora....	57
Figura 5.46 – Média das diferenças de meia em meia hora [J/m^2] para cada classe de fração da duração do dia e índice de claridade calculado com base nas previsões em Sines.....	57
Figura 5.47 – Desvio padrão da média das diferenças de meia em meia hora [J/m^2] para cada classe de fração da duração do dia e índice de claridade calculado com base nas previsões em Sines.....	57
Figura 5.48 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e temperatura a 2m em K previstas pelo ECMWF para Évora.....	58
Figura 5.49 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e temperatura a 2m em K previstas pelo ECMWF para Sines.....	58
Figura 5.50 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da temperatura a 2 metros e do índice de claridade calculado com os dados de previsão para Évora.....	59
Figura 5.51 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da temperatura a 2 metros e do índice de claridade calculado com os dados de previsão para Sines.....	59
Figura 5.52 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e humidade relativa em % calculada com as previsões do ECMWF para Évora.....	60
Figura 5.53 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e humidade relativa em % calculada com as previsões do ECMWF para Sines.....	60
Figura 5.54 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da humidade relativa e do índice de claridade calculado com os dados de previsão para Évora.....	61
Figura 5.55 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da humidade relativa e do índice de claridade calculado com os dados de previsão para Sines.....	62
Figura 5.56 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e coluna de água prevista para Évora.....	62
Figura 5.57 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e coluna de água prevista para Sines.....	63
Figura 5.58 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da coluna de água e do índice de claridade calculado com os dados de previsão para Évora.....	63
Figura 5.59 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da humidade relativa e do índice de claridade calculado com os dados de previsão para Sines.....	64

Figura 6.1 – Irradiação solar global horária para Évora.	65
Figura 6.2 – Irradiação solar global de meia em meia hora para Évora.....	65
Figura 6.3 – Irradiação solar global horária para Sines.	66
Figura 6.4 – Irradiação solar global de meia em meia hora para Sines.	66
Figura 6.5 – Diferenças horárias de irradiação solar global em kJ/m ² para Évora.....	66
Figura 6.6 – Diferenças de meia em meia hora de irradiação solar global em kJ/m ² para Évora.....	66
Figura 6.7 – Diferenças horárias de irradiação solar global em kJ/m ² para Sines.	67
Figura 6.8 – Diferenças de meia em meia hora de irradiação solar global em kJ/m ² para Sines.	67
Figura 6.9 – Irradiação solar global horária para Évora.	67
Figura 6.10 – Irradiação solar global de meia em meia hora para Évora.....	67
Figura 6.11 – Irradiação solar global horária para Sines.	68
Figura 6.12 – Irradiação solar global de meia em meia hora para Sines.	68
Figura 6.13 – Diferenças horárias de irradiação solar global em kJ/m ² para Évora.....	68
Figura 6.14 – Diferenças de meia em meia hora de irradiação solar global em kJ/m ² para Évora...	68
Figura 6.15 – Diferenças horárias de irradiação solar global em kJ/m ² para Sines.	69
Figura 6.16 – Diferenças de meia em meia hora de irradiação solar global em kJ/m ² para Sines. ..	69
Figura 6.17 – Irradiação solar global horária para Évora.	69
Figura 6.18 – Irradiação solar global de meia em meia hora para Évora.....	69
Figura 6.19 – Irradiação solar global horária para Sines.	70
Figura 6.20 – Irradiação solar global de meia em meia hora para Sines.	70
Figura 6.21 – Diferenças horárias de irradiação solar global em kJ/m ² para Évora.....	70
Figura 6.22 – Diferenças de meia em meia hora de irradiação solar global em kJ/m ² para Évora...	70
Figura 6.23 – Diferenças horárias de irradiação solar global em kJ/m ² para Sines.	71
Figura 6.24 – Diferenças de meia em meia hora de irradiação solar global em kJ/m ² para Sines. ..	71
Figura 6.25 – Irradiação solar global de meia em meia hora para Évora.....	71
Figura 6.26 – Irradiação solar global de meia em meia hora para Sines.	71
Figura 6.27 – Diferenças horárias de irradiação solar global em kJ/m ² para Évora.....	72
Figura 6.28 – Diferenças horárias de irradiação solar global em kJ/m ² para Sines.	72
Figura 6.29 – Diferenças entre as previsões dos vários modelos apresentados e as medições de meia em meia hora em kJ/m ² para Évora.....	73
Figura 6.30 – Diferenças entre as previsões dos vários modelos apresentados e as medições de meia em meia hora em kJ/m ² para Sines.....	73
Figura 7.1 – Fluxograma do algoritmo a desenvolver.....	76
Figura V.1 - Diferenças horárias, em J/m ² , entre previsões (calculadas com <i>downscaling</i> espacial através de interpolação linear dupla) e medições em função do índice de claridade calculados com medições em Évora.	101
Figura V.2 - Diferenças horárias, em J/m ² , entre previsões (calculadas com <i>downscaling</i> espacial através de interpolação linear dupla) e medições em função do índice de claridade calculado com dados de irradiação solar global previstos em Évora.....	101
Figura V.3 - Diferenças horárias, em J/m ² , entre previsões (calculadas com <i>downscaling</i> espacial através de interpolação linear dupla) e medições em função do índice de claridade calculados com medições em Sines.....	102

Figura V.4 - Diferenças horárias, em J/m^2 , entre previsões (calculadas com <i>downscaling</i> espacial através de interpolação linear dupla) e medições em função do índice de claridade calculado com dados de irradiação solar global previstos em Sines.	102
Figura VI.1 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da temperatura a 2m prevista pelo ECMWF para Évora.	103
Figura VI.2 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da temperatura a 2m prevista pelo ECMWF para Sines.	104
Figura VI.3 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da humidade relativa determinada com as previsões do ECMWF para Évora.	104
Figura VI.4 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da humidade relativa determinada com as previsões do ECMWF para Sines.	105
Figura VI.5 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da intensidade do vento determinada com as previsões do ECMWF para Évora.	105
Figura VI.6 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da intensidade do vento determinada com as previsões do ECMWF para Sines.	106
Figura VI.7 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e intensidade do vento em m/s calculada com as previsões do ECMWF para Évora.	106
Figura VI.8 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e intensidade do vento em m/s calculada com as previsões do ECMWF para Sines.	107
Figura VI.9 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da nebulosidade prevista para Évora.	107
Figura VI.10 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da nebulosidade prevista para Sines.	108
Figura VI.11 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e nebulosidade prevista para Évora.	108
Figura VI.12 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e nebulosidade prevista para Sines.	109
Figura VI.13 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da altura da base das nuvens prevista para Évora.	109
Figura VI.14 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da altura da base das nuvens prevista para Évora.	110
Figura VI.15 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e altura da base das nuvens prevista para Évora.	110
Figura VI.16 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e altura da base das nuvens prevista para Sines.	111
Figura VI.17 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da coluna de água prevista para Évora.	111
Figura VI.18 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da coluna de água prevista para Sines.	112
Figura VI.19 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da coluna de ozono prevista para Évora.	112

Figura VI.20 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da coluna de ozono prevista para Sines.....	113
Figura VI.21 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e coluna de ozono prevista para Évora.	113
Figura VI.22 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e coluna de ozono prevista para Sines.	114
Figura VI.23 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da visibilidade prevista para Évora.....	114
Figura VI.24 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da visibilidade prevista para Sines.	115
Figura VI.25 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e visibilidade prevista para Évora.....	115
Figura VI.26 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e visibilidade prevista para Sines.....	116

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Fatores de correção para os diferentes tipos de clima [72].	12
Tabela 2.2 - Coeficientes do modelo ASHRAE para o dia 21 de cada mês [69].	14
Tabela 3.1 - Variáveis recolhidas do ECMWF.	22
Tabela 3.2 - Características dos locais de medição utilizados.	23
Tabela 5.1 - Classificação de acordo com o valor de índice de claridade.	35
Tabela 7.1 - Descrição e atributos da variável de estado codificada (FLAG).	78

Nomenclatura

Letras e Símbolos

Símbolo	Unidade	Descrição
α	°	Altura solar
δ	°	Declinação solar
ϕ	°	Ângulo solar zenital ou ângulo de zénite
AST	h	Tempo solar aparente
e	Pa	Pressão de vapor
e_0	Pa	Pressão de vapor à temperatura T_0
e_s	Pa	Pressão de vapor saturado
ET	min	Equação do tempo
F_i		Valor associado à FLAG i
G	m^2/s^2	Geopotencial
h	°	Ângulo horário
h_{sr}	°	Ângulo horário correspondente ao nascer do Sol
h_{ss}	°	Ângulo horário correspondente ao pôr do Sol
H_i	h	Hora i
H_N	h	Hora ou meia hora imediatamente antes da hora ou meia hora do nascer do Sol, respetivamente
H_P	h	Hora ou meia hora imediatamente após a hora ou meia hora do pôr do Sol, respetivamente
HR	%	Humidade relativa do ar
I	J/m^2	Irradiação solar global no plano horizontal à superfície
I_0	J/m^2	Irradiação solar global no plano horizontal no topo da atmosfera
I_{0n}	W/m^2	Irradiância solar normal no topo da atmosfera
I_{bn}	W/m^2	Irradiância solar direta normal
$I_{corrigido, H_i}$	J/m^2	Irradiação solar global no plano horizontal corrigida para a hora ou meia hora i
I_g	W/m^2	Irradiância solar global no plano horizontal
I_{H_i}	J/m^2	Irradiação solar global no plano horizontal correspondente à hora ou meia hora i

I_{HN}	J/m ²	Irradiação solar global no plano horizontal correspondente à hora ou meia hora H_N
I_{HP}	J/m ²	Irradiação solar global no plano horizontal correspondente à hora ou meia hora H_P
I_i	J/m ²	Irradiação solar global horária no plano horizontal da hora i
I_{sc}	W/m ²	Constante solar
J_i	J/m ²	Irradiação solar global no plano horizontal da segunda meia hora da hora i
$J_{i-1/2}$	J/m ²	Irradiação solar global no plano horizontal da primeira meia hora da hora i
K_t	%	Índice de claridade
L	°	Latitude
LC	h	Correção de longitude
Lon	°	Longitude do local
Lon_m	°	Longitude do meridiano de referência
LST	h	Tempo legal local
L_v	J/kg	Calor latente de vaporização
m_f		Massa de ar
N		Dia do ano
P		Valor da variável prevista
R_v	J/(kgK)	Constante dos gases para o vapor de água
T	K	Temperatura média do ar
T_0	K	Temperatura de referência
T_b		Transmissividade da atmosfera
T_d	K	Temperatura do ponto de orvalho
T_{df}		Coefficiente de transmissividade de radiação difusa
T_i	K	Temperatura média do ar na hora i
u	m/s	Componente u do vento
U_i	K	Temperatura média do ar na segunda meia hora da hora i
$U_{i-1/2}$	K	Temperatura média do ar na primeira meia hora da hora i
UTC	h	Tempo universal

v	m/s	Componente v do vento
V		Valor compactado da variável prevista
W_s	m/s	Intensidade do vento
Z	m	Altitude

Siglas e Acrónimos

AER	<i>Atmospheric and Environmental Research, Inc.</i>
AFRL	<i>Air Force Research Laboratory</i>
ANN	Redes artificiais neuronais
ARM	<i>Atmospheric Radiation Measurement</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-range Weather Forecasts</i>
EDA	<i>Ensemble of Data Assimilations</i>
ENS	<i>Forecast ensemble</i>
EUMETSAT	<i>European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites</i>
GFS	<i>Global Forecast System</i>
GHI	<i>Global Horizontal Irradiation (Irradiação Solar Global)</i>
GMS	<i>Geostationary Meteorological Satellite</i>
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
HRES	Previsão do ECMWF de alta resolução
ICT	Instituto de Ciências da Terra
IDW	Ponderação pelo inverso da distância
IFS	<i>Integrated Forecast System</i>
JMA	<i>Japanese Meteorological Agency</i>
LAM	Modelo de área limitada
LBL	Modelos <i>line-by-line</i>
MARS	<i>Meteorological Archival and Retrieval System</i>
McICA	<i>Monte Carlo Independent Column Approximation</i>
MOS	Métodos estatísticos de pós-processamento
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
NWP	Modelo numérico de previsão do tempo
PV	Fotovoltaico
RMDCN	<i>Regional Meteorological Data Communication Network</i>
RRTM	<i>Rapid Radiative Transfer Model</i>
SVM	Máquinas de vetores de suporte
WMO	World Meteorological Organization

1. Introdução

A previsão do tempo é um dos campos de estudo da meteorologia. Esta consiste em prever as condições meteorológicas num determinado local baseando-se em leis da física e em modelos matemáticos e numéricos. Estes modelos são normalmente executados em computadores de elevada capacidade e incorporam dados de observações realizadas por todo o mundo gerando variáveis de prognóstico. As previsões resultantes podem ser utilizadas para diversos fins, não só para o planeamento do dia-a-dia, mas também para a prevenção de estragos e redução de prejuízos no caso de condições atmosféricas extremas. A previsão do tempo é ainda de elevada importância para empresas e atividades relacionadas com a agricultura, ambiente, transportes, energia, entre outros [1].

Os sistemas de energia que tiram partido dos recursos renováveis, como é o caso do vento ou da radiação solar, estão particularmente dependentes das condições meteorológicas e da climatologia local. Assim, uma boa previsão do tempo pode ser utilizada para prever a produção de energia destes sistemas bem como dimensionar e adaptar sistemas auxiliares convencionais de produção de energia ou até mesmo a rede elétrica em concordância, permitindo, neste último caso, a integração de uma maior fração de energia obtida através de recursos renováveis na rede e uma maior segurança de abastecimento [2].

A indústria da energia solar tem vindo a crescer desde os anos 90 principalmente como resposta a problemas ambientais relacionados com a utilização de combustíveis fósseis. No final de 2015 a potência global instalada era de 227GW para tecnologias fotovoltaicas, 435GW para coletores solares térmicos e 4,8GW para sistemas de concentração solar sendo esperado um crescimento do número de instalações de sistemas solares no futuro [3]. Sendo assim, existe um grande interesse em dados de radiação solar fiáveis por forma a realizar projetos adequados a tais níveis de radiação.

A avaliação direta do recurso solar é feita através de medições na superfície realizadas por piranómetros. Estes são os radiómetros mais comuns em estações meteorológicas e medem a irradiância solar global (direta e difusa) de pequeno comprimento de onda ($0,29 \mu\text{m}$ a $2,8 \mu\text{m}$) num plano horizontal ao nível do solo. Utilizando um dispositivo de sombreamento que impede a componente direta da radiação solar de atingir o sensor do piranómetro obtém-se medidas de radiação difusa. A radiação solar direta normal é medida por radiómetros designados por pireliómetros. Estes têm uma forma telescópica com uma abertura de pequenas dimensões e utilizam um sistema de seguimento da posição do Sol para a medição da radiação solar direta normal [4].

A radiação solar global é a variável mais utilizada na realização de estudos sobre o recurso solar e, estando bem calibrados, os piranómetros oferecem as estimativas mais precisas [5]. Porém, os piranómetros são aparelhos sensíveis que requerem manutenção e calibração periódica para conseguirem manter o nível de precisão ótimo, o seu preço e da sua instalação não permitem a sua instalação com o grau de densidade espacial desejável, especialmente em países em desenvolvimento e, portanto, a obtenção de dados de medições de radiação solar com uma densidade espacial considerável nem sempre é possível.

Na ausência de medições, existem diferentes métodos para estimar o valor de irradiância solar global. Estes podem ser utilizados para prever a radiação solar para um local específico, mas também para gerar uma previsão contínua no espaço como é o caso dos mapas de radiação solar. Inicialmente, as previsões meteorológicas eram baseadas na utilização de modelos empíricos

paramétricos em locais onde estavam instalados sensores de medição de variáveis mais comuns, como a duração do dia e temperatura, resolvendo expressões analíticas com estes dados de medição como *input* e obtendo dados de prognóstico de irradiância solar global [6]. Como é possível calcular a radiação solar extraterrestre apenas com expressões que definem a geometria Terra-Sol, praticamente todos os modelos paramétricos tentam obter uma aproximação da transmissividade da atmosfera que relaciona a radiação extraterrestre com a radiação à superfície da Terra. Os modelos paramétricos são então classificados de acordo com a segunda variável utilizada para a estimativa da radiação. Inicialmente, modelos paramétricos que utilizam o número de horas de Sol como variável secundária eram os mais abundantes e precisos [6]. Estes modelos derivam da equação de Ångström-Prescott [7,8]. Outra variável muito utilizada para estas correlações era a nebulosidade. Medida manualmente em Oktas, esta variável é utilizada no modelo de Black [9] e no de Supit-Van Kappel [10]. No entanto, nem o número de horas de Sol, nem a nebulosidade eram variáveis medidas na maior parte das estações meteorológicas e, devido à necessidade de intervenção humana nas medições, existiam falhas ao longo do tempo. Consequentemente, foram desenvolvidos outros modelos que utilizam variáveis cuja medição é mais comum em estações meteorológicas por todo o mundo como temperatura e precipitação. O modelo de Bristow-Campbell [11] e o de Hargreaves [12] são dois dos modelos mais conhecidos baseados em temperaturas, enquanto que os modelos de Jong-Stewart [13] e Liu-Scott [14] utilizam precipitação.

Com o desenvolvimento de novos e melhores sensores e a sua instalação com uma maior densidade espacial, outras propriedades como a velocidade do vento, a humidade relativa e fatores geográficos foram incluídas em modelos paramétricos. Em [1] pode ser encontrada mais informação sobre modelos paramétricos assim como novos desenvolvimentos híbridos destes. A maior desvantagem deste tipo de modelos é a necessidade de calibração no tempo e espaço para a obtenção de previsões válidas, existindo sempre a necessidade de ajustes aquando de uma nova previsão ou uma previsão realizada para um local diferente. Ademais, a utilização de apenas uma variável como *input* e correlações lineares simples, limita a precisão das previsões obtidas. Consequentemente, estas correlações simples evoluíram nos anos 90 para modelos estatísticos mais sofisticados com o impulsionamento dos avanços informáticos. Estes combinam várias variáveis em relações não lineares mais complexas. No caso da previsão de radiação, existem estudos que testam diferentes tipos de algoritmos como as redes artificiais neuronais (ANN) [15–17], máquinas de vetores de suporte (SVM) [18,19], árvores de regressão [20] ou lógica difusa [21]. Para além destes, foram ainda desenvolvidas técnicas híbridas que combinam estes algoritmos com modelação meta-heurística como algoritmos genéticos (GA) [22,23] de forma a otimizar e automatizar o processo de calibração. Porém, tanto os modelos paramétricos como os modelos estatísticos apenas conseguem gerar dados de previsão discretos para os locais onde existem medições de variáveis secundárias.

Um modelo de previsão de radiação solar em condições de céu limpo é um conjunto de equações capazes de produzir uma estimativa da irradiância solar que chega à superfície terrestre em condições de céu limpo [24]. Podem estimar irradiância direta, difusa ou global sendo a última normalmente obtida a partir das primeiras. Estes modelos têm em conta a dispersão, reflexão e absorção de radiação que ocorre na atmosfera devido a componentes como o vapor de água, o ozono, aerossóis, entre outros e os processos atmosféricos como a turbidez. Existe uma grande variedade de métodos para contabilizar estes fatores. Alguns modelos necessitam de apenas um *input* enquanto outros necessitam de vários, sendo muitos desenvolvidos para um determinado

local ou baseados em coeficientes arbitrários, podendo ter performances bastante distintas para diferentes locais.

Os modelos mais simples deste tipo são utilizados para a projeção de sistemas de energia solar visto que estes preveem a irradiância solar correspondente à irradiância solar máxima possível, tornando-se um guia da radiação solar ou produção energética de um sistema máximas num determinado instante ou período de tempo. Pelo mesmo motivo, estes modelos são também utilizados para a projeção de sistemas de aquecimento e arrefecimento de edifícios [25], como *inputs* de modelos de produção agrícola [26,27] e na validação de modelos meteorológicos dinâmicos [28]. A utilização mais comum destes modelos é, no entanto, em análises do recurso solar pois uma boa estimativa da radiação em condições de céu limpo é importante para o cálculo de várias propriedades e índices de radiação que são a base para a normalização de dados de radiação solar, como é o caso do índice de claridade. Esta normalização é necessária para a realização de análises mais detalhadas como por exemplo análises de variabilidade [29], determinação de características das nuvens [30], previsão de características atmosféricas futuras [31,32], entre outras, sendo assim importante que estes modelos possuam uma precisão adequada. De forma semelhante, modelos de radiação solar em condições de céu limpo têm vindo a ser utilizados como *inputs* na modelação de sistemas fotovoltaicos (PV) [33] e na recolha de características da radiação solar através de imagens de satélite [34].

Vários autores reviram e analisaram diversos modelos de radiação solar em condições de céu limpo com mais ou menos variáveis de *input*. Um dos primeiros estudos [35] analisa 11 modelos ao compará-los com dados teóricos obtidos a partir de três códigos de previsão espectral sofisticados e medições de irradiância solar horária provenientes de 7 locais distintos da América do Norte, Europa e Ásia. Destes, 4 modelos foram considerados os mais precisos: CPCr2 [26], Iqbal-C [4], EEC [36] e PSI [26]. Em [37] 54 modelos de radiação solar em condições de céu limpo foram analisados e comparados com medições de duas estações meteorológicas da Roménia concluindo que tanto modelos simples (poucas variáveis como *input*) como modelos mais complexos têm uma fiabilidade elevada, tendo estes últimos uma melhor precisão na maioria dos casos. Em [38] foram comparados 18 modelos de céu limpo utilizando medições de zonas com climas diversos, elevada frequência e qualidade de dados obtendo, em ordem decrescente, uma melhor precisão para os modelos REST2 [39], Ineichen [40], Hoyt [41], Bird [42–44] e Iqbal-C [4] em termos de irradiância solar direta normal. Em [34], 8 modelos de elevada precisão foram analisados ao serem comparados com 16 bases de dados da América do Norte e Europa. Os modelos foram categorizados como simples, necessitando apenas do coeficiente de turbidez e a espessura ótica dos aerossóis em que os modelos Esra [45] e Molineaux [46] tiveram melhores resultados, ou como complexos, necessitando de medições de radiação espectrais onde o modelo Solis [40] apresentou melhores resultados. No entanto, todos os modelos referidos anteriormente necessitam de variáveis meteorológicas impossíveis de obter *offline* como a pressão barométrica, a temperatura do ar, humidade relativa, água precipitável, entre outras.

Modelos de transferência radiativa de energia solar são caracterizados pela modelação do espectro extraterrestre que é transmitido, absorvido ou disperso pelos constituintes da atmosfera sendo, normalmente, mais complexos do que os modelos referidos anteriormente. Os modelos de transferência radiativa podem ainda ser classificados como modelos *line-by-line* (LBL) que resolvem o espectro solar utilizando as propriedades quânticas do meio que é a atmosfera com elevada resolução necessitando, no entanto, de grandes bases de dados e recursos computacionais como é

o caso do modelo HITRAN (*High-resolution Transmission*) [47]. Ou podem ser classificados como modelos de banda que são basicamente modelos LBL simplificados [48]. Os modelos de banda representam grupos de linhas de absorção como funções de transmissividades em função de parâmetros como a concentração de gases de efeito de estufa, pressão e coeficientes de absorção como acontece com os modelos MODTRAN (*Moderate resolution Transmittance*) e LOWTRAN (*Low resolution Transmittance*) desenvolvidos pelo AFRL (*Air Force Research Laboratory*). Estes modelos têm em conta cenários complexos como nevoeiro, fumo, diversos tipos de propriedades de aerossóis à escolha, entre outros, sendo desenhados para resolver a transmissividade da atmosfera entre dois pontos superiores ou na superfície da Terra.

Modelos baseados na parametrização de funções de transmissividade e absorção de constituintes atmosféricos são consideravelmente mais simples e designam-se apenas por modelos de transferência radiativa. Estas funções com elevada dependência do comprimento do percurso ótico dos fotões através da atmosfera são ainda dependentes da espessura ótica dos constituintes desta incluindo moléculas (dispersão de Rayleigh), ozono, vapor de água, mistura de gases, gases vestigiais e transmissividades de aerossóis. As funções de transmissividade resultantes modificam o espectro extraterrestre para produzir a distribuição espectral transmitida tendo, geralmente, uma resolução espectral inferior à dos modelos complexos. O modelo SMARTS (*Simple Model for Atmospheric Transmission of Sunshine*) desenvolvido para o NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) é um destes modelos que requer um pequeno número de variáveis como *input* sendo útil para aplicações de engenharia que requeiram uma precisão e resolução menores sendo mais versátil e de simples utilização [49].

Os modelos de previsão numérica do tempo (NWP, em inglês) resolvem as equações físico-matemáticas que descrevem processos atmosféricos para obter estimativas da evolução das condições atmosféricas ao longo do tempo. As principais equações que descrevem o movimento na atmosfera (designadas de equações primitivas) são a segunda lei de Newton (princípio fundamental da dinâmica), a primeira lei da termodinâmica (princípio da conservação de energia), a equação da continuidade (conservação de massa), a equação de estado e equações de conservação de água e eventualmente outras substâncias presentes na atmosfera [50]. Estas equações são modelos simplificados dos processos físicos que ocorrem na atmosfera aos quais são aplicadas aproximações numéricas dando origem aos modelos NWP.

Os modelos NWP dividem a atmosfera em elementos de volume com os pontos da grelha de previsão no seu centro [51]. As equações do modelo são resolvidas de forma a obter os valores de cada variável atmosférica em cada ponto da grelha sendo a resolução espacial do modelo representada pela distância mínima entre pontos da grelha de previsão. Resoluções mais elevadas (grelhas com mais pontos e mais próximos) resultam em modelos mais precisos, mas também necessitam de uma maior capacidade e tempo computacionais para serem executados. O mesmo acontece para um maior número de camadas atmosféricas resultantes da divisão da atmosfera em altitude. Normalmente, os modelos NWP dividem a atmosfera em camadas de diferentes espessuras, existindo um maior número de camadas na parte inferior da atmosfera onde a maior parte dos fenómenos de transferência ocorrem. Isto permite uma melhor definição dos processos e características da camada limite contribuindo significativamente para a previsão de variáveis como ventos a baixos níveis, turbulência, temperatura e estabilidade.

Dependendo do domínio, os modelos NWP podem ser designados por globais ou modelos de área limitada (LAM). Os modelos globais resolvem as equações para todo o globo enquanto que os

LAM apenas os fazem para uma determinada área. Devido às limitações em termos computacionais, apenas alguns centros meteorológicos executam modelos globais. O centro meteorológico alemão executa um modelo global (GME) com uma resolução horizontal de 40 km e 40 camadas verticais [52]. O NCEP/NCAR também executa um modelo de 40km de resolução [53]. Por outro lado, o ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecasts*) executa um modelo global operacional com uma resolução de 25km devido ao seu acesso a supercomputadores e grandes bases de dados. Devido à sua baixa resolução, modelos globais não conseguem representar corretamente fenômenos de pequena escala como a convecção induzida pela orografia. Existem, no entanto, métodos de pós-processamento como métodos estatísticos (*model output statistics - MOS*) que são frequentemente utilizados para aperfeiçoar os *outputs* de modelos NWP [54]. A técnica MOS consiste em utilizar observações para corrigir erros locais nas previsões dos modelos NWP. Padrões de erro consistentes permitem ao MOS a produção de uma função de redução da diferença entre previsões e medições a ser aplicada localmente em previsões futuras [55]. Em [56] os dados de previsão de irradiância solar global no plano horizontal obtidos através do modelo radiativo de [57] foram comparados com medições, encontrando uma relação entre o valor da diferença média entre previsão e medição e a nebulosidade. Em [58] dados de previsão de irradiação solar global no plano horizontal obtidos para o dia seguinte à previsão do ECMWF e do GFS (*Global Forecast System*) foram comparados com dados de medição numa só localização tendo sido obtidas diferenças médias entre previsões e medições de cerca de 19% sendo aproximadamente constante ao longo do dia até 3 dias de previsão. Os autores de [59] incluíram efeitos de aerossóis na irradiância solar no modelo do ECMWF, tendo sido obtida uma redução do erro médio quadrático das previsões de irradiação solar global horária para o segundo e terceiro dias de previsão de 11,5% para 7,2% para condições de céu limpo, enquanto que a diferença média entre previsões e medições diminuiu de 9,8% para 5,1%. Como o modelo NWP original mostrava uma sobrestimação considerável da irradiância para níveis de nebulosidade intermédios, os autores de [60] modelaram uma função de correção da diferença entre previsões e medições como uma função polinomial dependente dos valores previstos de índice de claridade e ângulo solar zenital reduzindo o erro quadrático médio das previsões horárias em 5% para previsões com uma escala temporal de 24 horas.

No entanto, os modelos produzem previsões para locais discretos. A necessidade de estimativas de radiação solar contínuas no espaço impulsionou a investigação e desenvolvimento de outros métodos de pós-processamento. O método mais simples em uso são modelos de interpolação para a geração de mapas com recurso às medições pontuais de piranómetros [61] ou mesmo às estimativas realizadas por modelos estatísticos ou paramétricos quando a distância entre locais de medição é excessiva [62,63]. A interpolação pode ser determinista ou geoestatística. Quase todas as técnicas quer deterministas quer geoestatísticas preveem o valor de uma variável num local onde este é desconhecido através de uma ponderação de valores conhecidos em determinados locais, no entanto, estas diferem no modo em como a ponderação é realizada. Técnicas determinísticas realizam uma ponderação baseada na similaridade ou proximidade em termos espaciais dos locais em questão. Algumas destas técnicas são as *splines*, a ponderação pelo inverso da distância (IDW), a regressão linear ou a função de base radial [1]. Por outro lado, técnicas geoestatísticas utilizam a autocorrelação espacial dos pontos para realizar a ponderação. A técnica geoestatística mais comum é denominada *kriging*, que é, ela própria, um conjunto de técnicas. Técnicas de interpolação

têm sido amplamente utilizadas não só para a radiação solar, mas também para outras variáveis ambientais.

Outra solução para o problema de uma previsão espacialmente discreta são os modelos com base em dados de satélite. Estes modelos preveem radiação solar global com base na informação da radiação refletida pela superfície e atmosfera terrestres obtidas através de radiômetros posicionados em satélites. A irradiação terrestre tem sido estimada com base em imagens de satélite desde o fim dos anos 80, podendo as imagens de radiação refletida ser obtidas em satélites geoestacionários ou de órbita polar. Os satélites geoestacionários orbitam no plano equatorial em sincronia com a rotação da Terra cobrindo uma área específica, mas a uma altitude suficiente para obter uma imagem total do disco terrestre. Consequentemente, mapas desenvolvidos com imagens de satélites geoestacionários têm uma resolução espacial limitada, mas uma resolução temporal elevada (até 15 minutos). Alguns exemplos são o Meteostat para a região europeia, o GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) para a região americana, ou o GMS (*Geostationary Meteorological Satellite*) para a região japonesa. Por outro lado, satélites de órbita polar têm uma órbita de norte para sul a uma altitude de cerca de 800km. Deste modo, os mapas obtidos por estes satélites cobrem a totalidade do globo, mas com uma baixa resolução temporal visto transitarem por um determinado local apenas duas vezes por dia. Alguns exemplos são o Metop da EUMETSAT (*European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites*) e os satélites da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

Programas de reanálise meteorológica também geram mapas de radiação ao combinar dados de medição com previsões de modelos de previsão do tempo numéricos (NWP). A vantagem desta técnica é que todas as variáveis físicas e meteorológicas são geradas com o mesmo modelo obtendo mapas com cobertura global numa malha espacial e sem falhas. Alguns produtos de reanálise mais conhecidos são a reanálise ERA-Interim do ECMWF, a reanálise MEERA da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), a reanálise NEP/NCAR da NOAA e a reanálise JRA-55 da JMA (*Japanese Meteorological Agency*).

Dependendo da aplicação e da correspondente escala temporal umas técnicas de previsão podem ser mais adequadas que outras. Para previsões de escala temporal bastante reduzida (apenas algumas horas) a utilização de modelos de previsão com base em imagens de satélite é adequada [60]. No entanto, para aplicações onde é necessária uma previsão de um ou mais dias, os modelos NWP são os mais indicados.

O objetivo deste trabalho, realizado no âmbito do contrato de prestação de serviços da Universidade de Évora com a empresa Warmhole, Lda, é o desenvolvimento de um algoritmo de previsão de radiação solar com correção através de técnicas de *downscaling* físico e estatístico para aplicação em sistemas solares térmicos de média/baixa temperatura de forma a que se tenha uma previsão da produção de energia destes sistemas e se possa até controlar o modo de operação conforme a disponibilidade de radiação e os hábitos do utilizador. Os dados de previsão a corrigir têm de ser o mais exatos possível e fornecidos a uma escala global para que o algoritmo desenvolvido possa ser utilizado em qualquer parte do mundo e uma escala temporal de pelo menos 24 horas, sendo assim necessário um modelo NWP global.

O modelo escolhido foi o desenvolvido pelo ECMWF visto ser um dos modelos globais mais precisos assim como devido à existência de uma licença para acesso à sua base de dados (*Meteorological Archival and Retrieval System - MARS*) por parte do Instituto de Ciências da Terra (ICT) da Universidade de Évora.

O ECMWF é uma organização internacional apoiada por 18 países europeus (incluindo Portugal) e 4 estados cooperantes. Criada em 1975, esta organização tem como objetivos o desenvolvimento de modelos dinâmicos da atmosfera com vista à obtenção de previsões meteorológicas a médio-prazo através de métodos numéricos, a obtenção dos dados necessários à elaboração das previsões, a investigação científica e técnica orientada para a melhoria da qualidade das previsões, a disponibilização dos serviços meteorológicos e resultados de estudos efetuados aos estados membros, a assistência à organização meteorológica mundial (WMO) e a assistência na formação avançada de cientistas [64]. Para isso, o ECMWF conta com diversos supercomputadores e sistemas de armazenamento de dados assim como uma rede que satisfaz as necessidades de telecomunicação da região europeia (*Regional Meteorological Data Communication Network – RMDCN*).

O algoritmo a desenvolver terá assim de aceder ao MARS e fazer um pedido das variáveis necessárias. No entanto, existe a possibilidade de falhas na conexão ou nos dados obtidos. Para esses casos será implementado um sistema secundário de previsão de radiação solar. Este utilizará dados que se podem obter *offline* para realizar a previsão e, por isso mesmo, apenas utilizará variáveis como o dia do ano, a hora e a posição do Sol em relação ao sistema. Assim, foram selecionados modelos mais simples e conseqüentemente com uma precisão inferior. Existem vários autores que analisaram tais modelos [37,38,65]. Neste projeto foram escolhidos modelos simples de previsão radiação solar em condições de céu limpo que se encontram atualmente em uso como é o caso do modelo de Fu e Rich [66], do modelo HLJ [67,68] e do modelo ASHRAE [69]. Foi ainda analisado o modelo de transferência radiativa SMARTS que consiste num código Fortran utilizado em diversas aplicações de energia solar em condições de céu limpo [70].

1.1. Objetivos

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito do contrato de prestação de serviços da Universidade de Évora com a empresa Warmhole, Lda, que tem como objetivo o desenvolvimento de um algoritmo de previsão de radiação solar e temperatura média do ar que terá como *input* dados de previsão meteorológica gerados por modelos de previsão numérica do tempo, os quais possuem malhas e escalas temporais com resolução insuficiente para a aplicação desejada. Estes dados de previsão serão corrigidos para o local pretendido através do refinamento espacial e temporal utilizando técnicas de *downscaling* físico e estatístico. O modelo a integrar no algoritmo de previsão terá em consideração a dependência da radiação solar com outras variáveis meteorológicas relevantes e com as características específicas do local de interesse, sendo essas variáveis identificadas no decurso do trabalho. O algoritmo de previsão será validado com valores experimentais. Os valores de saída do algoritmo serão formatados de forma a que sejam de fácil leitura e utilização em diferentes aplicações ou plataformas informáticas.

Esta dissertação tem assim como objetivos:

- ◆ a realização de um estudo preliminar das previsões de radiação solar global realizadas pelo ECMWF comparando-as com observações, assim como o estudo da sua dependência com variáveis relativas à geometria Terra-Sol ou variáveis atmosféricas previstas;
- ◆ o desenvolvimento de técnicas de *downscaling* temporal e espacial das previsões por forma a produzir um algoritmo que forneça 72 horas de previsões de radiação solar global e temperatura

média do ar de meia em meia hora para um determinado local que pode estar localizado em qualquer parte da Terra;

- ◆ o estudo de modelos de previsão de radiação solar em condições de céu limpo a introduzir no algoritmo para o caso de ocorrerem falhas nos dados ou recolha destes do ECMWF;
- ◆ o desenvolvimento da primeira versão do algoritmo de radiação solar.

1.2. Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada em 8 capítulos incluindo a introdução. Segue-se uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo.

O segundo capítulo apresenta os conceitos e cálculos básicos necessários à compreensão desta dissertação desde as relações da geometria Terra-Sol aos modelos de radiação solar em condições de céu limpo e ao modelo utilizado pelo ECMWF para a geração de previsões das diversas variáveis meteorológicas.

O terceiro capítulo apresenta a forma como os dados de medição e previsão são recolhidos e posteriormente tratados para análise assim como uma breve descrição dos locais e instrumentos utilizados para a obtenção de observações.

O quarto capítulo apresenta os métodos utilizados para o reescalonamento e análise dos dados de previsão obtidos, nomeadamente o *downscaling* temporal e espacial dos dados assim como os cálculos utilizados para determinar as diferenças entre previsões e medições.

O quinto capítulo apresenta a análise dos dados de previsão de irradiação solar global por comparação com as observações assim como a análise da dependência desta diferença com variáveis atmosféricas previstas pelo ECMWF e com a posição aparente do Sol.

O sexto capítulo consiste na análise dos modelos de radiação solar em condições de céu limpo selecionados através da comparação com as observações e previsões do modelo do ECMWF.

O sétimo capítulo apresenta a primeira versão do algoritmo a desenvolver incluindo os dados de *input* necessários e a definição da estrutura do *output* a obter.

Por fim, no oitavo capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho bem como linhas orientadoras para o trabalho futuro.

2. Modelação da radiação solar

Neste capítulo irão ser introduzidos os conceitos necessários para a compreensão do trabalho desenvolvido, tais como as equações relativas à geometria Terra-Sol e hora solar e a modelação e método de previsão de radiação solar.

2.1. Geometria Terra-Sol e hora solar

Para a análise dos dados de medição e previsão são necessários alguns conceitos básicos de geometria Terra-Sol e hora solar, conceitos estes que serão descritos nesta secção.

2.1.1. Dia do ano

O dia do ano, N , toma o valor de 1 no dia 1 de janeiro e 365 no dia 31 de dezembro. Para a contagem do dia do ano considera-se que o mês de fevereiro tem sempre 28 dias.

2.1.2. Declinação solar

A declinação solar, δ , é o ângulo entre a linha imaginária que une os centros do Sol e da Terra e a sua projeção no plano equatorial da Terra. Este ângulo depende principalmente da orientação do eixo polar em relação ao Sol que varia devido à rotação da Terra em torno deste. O eixo polar está inclinado $23,45^\circ$ em relação à normal do plano da elipse [71] que define a trajetória da Terra em torno do Sol. É a existência deste ângulo que dá origem às variações sazonais de radiação solar (estações) variando entre $23,45^\circ$ (solstício de verão) e $-23,45^\circ$ (solstício de inverno) ao longo do ano devido à translação da Terra, sendo positivo quando a linha imaginária Terra-Sol está para norte do plano do equador e 0° nos equinócios da primavera e outono. A declinação pode ser considerada constante durante um dia [71,72] e é calculada em graus através da Equação (2.1).

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad (2.1)$$

2.1.3. Tempo solar aparente e tempo legal local

O tempo solar aparente, AST , é o tempo baseado no movimento aparente do Sol no céu e depende do meridiano de referência de cada zona [71]. O meio-dia solar é o instante em que o Sol passa pelo meridiano local e que não coincide com as 12 horas do tempo legal do local, LST . O tempo universal, UTC , é baseado no meridiano de Greenwich, sendo a sua longitude de 0° . O tempo solar aparente pode ser calculado a partir da hora legal e vice-versa através da Equação (2.2).

$$AST = LST + \frac{ET}{60} \pm LC - DS \quad (2.2)$$

Em que ET é a equação do tempo que permite ter em conta a variação do dia solar devido à órbita da Terra em torno do Sol, à variação de velocidade de translação da Terra e à declinação. A equação do tempo pode ser aproximada em minutos através da Equação (2.3).

$$ET = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B) \quad (2.3)$$

onde o parâmetro B é dado pela Equação (2.4).

$$B = (N - 81) \frac{360}{364} \quad (2.4)$$

O termo LC introduz uma correção de longitude. Esta é necessária devido à existência de uma diferença entre a longitude do meridiano de referência e a longitude do local em questão. O valor de LC é calculado através da Equação (2.5) em horas sendo Lon_m a longitude do meridiano de referência e Lon a longitude do local.

$$LC = \frac{(Lon_m - Lon)}{15} \quad (2.5)$$

O termo DS representa o acerto da hora legal para o horário de verão ou inverno, que no caso de Portugal toma o valor de 1 hora entre o último domingo do mês de março e o último domingo do mês de outubro e zero no restante período do ano [71].

2.1.4. Ângulo horário

O ângulo horário, h , é o ângulo entre a projeção no plano do equador da linha imaginária que une o centro da Terra ao Sol e o meridiano local [71]. Assim, ao meio-dia solar o valor deste ângulo é 0° , antes do meio-dia solar é negativo e após o meio-dia solar é positivo. Este ângulo é calculado em graus através da Equação (2.6).

$$h = (AST - 12) \frac{360}{24} \quad (2.6)$$

2.1.5. Ângulo solar zenital

O ângulo solar zenital ou ângulo de zénite, Φ , é o ângulo entre a linha definida pelos raios solares e a vertical do local e pode ser calculado através da Equação (2.7) onde L é a latitude do local.

$$\cos(\Phi) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \quad (2.7)$$

O ângulo solar zenital relaciona-se com a altura solar, α , através da equação (2.8) visto esta ser definida como o ângulo entre a linha definida pelos raios solares e o plano do horizonte.

$$\phi + \alpha = 90 \quad (2.8)$$

2.1.6. Horas de nascer e pôr do Sol

As horas do nascer e pôr do Sol ocorrem, por definição, quando o ângulo solar zenital é 90° . Ou seja, aproximadamente quando o Sol surge ou desaparece no horizonte. Assim, basta resolver a equação (2.7) em ordem ao ângulo horário para um ângulo zenital de 90° obtendo a Equação (2.9). Esta equação permite determinar o ângulo horário do nascer do Sol, h_{sr} , e do pôr do Sol, h_{ss} . Os ângulos horários do nascer e pôr do Sol determinados são aplicados na Equação (2.6) que é resolvida em ordem ao tempo solar aparente para obter a hora solar do nascer e pôr do Sol, respetivamente. Caso seja necessário, as horas podem ser convertidas em horas UTC através da Equação (2.2).

$$h_{ss} = -h_{sr} = \cos^{-1}[-\tan(L) \tan(\delta)] \quad (2.9)$$

2.1.7. Fração da duração do dia

As diversas variáveis meteorológicas, e em particular a radiação solar, podem ser representadas em função do tempo ou do ângulo solar zenital. No entanto, uma vez que a hora de nascer e pôr do Sol e o ângulo solar zenital mínimo variam ao longo do ano, essas formas de representação poderão não ser adequadas em certos casos. Uma alternativa ao ângulo solar zenital é a adimensionalização da hora (tempo) com a duração do dia, permitindo assim representar e comparar os dados de radiação solar, ou de valores calculados a partir destes, ao longo dos dias independentemente da

altura do ano. Esta adimensionalização é feita através da divisão da hora pela duração do dia, calculada através da diferença entre as horas do pôr e nascer do Sol determinadas como descrito na Secção 2.1.6.

2.1.8. Irradiação solar no topo da atmosfera

O valor da irradiação solar no topo da atmosfera é necessário como referência para os valores de radiação à superfície da Terra. O valor diário da irradiação solar no topo da atmosfera, I_0 , depende apenas do dia do ano e é calculado através da Equação (2.10), sendo I_{sc} a constante solar com um valor de $1366,1\text{W/m}^2$ [70] que representa a quantidade de energia solar por unidade de tempo e área numa superfície plana perpendicular aos raios solares situada à distância média entre a Terra e o Sol e h_{sr} o ângulo horário correspondente ao nascer do Sol (determinado através da Equação (2.9)).

$$I_0 = \frac{24 \times 3600 I_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360N}{365}\right) \right] \left[\cos(L) \cos(\delta) \sin(h_s) + \frac{\pi h_{ss}}{180} \sin(L) \sin(\delta) \right] \quad (2.10)$$

Para calcular o valor de irradiação solar no topo da atmosfera para um determinado período de tempo utiliza-se a Equação (2.11), onde H_1 e H_2 correspondem às horas de início e fim desse período, respetivamente [4].

$$I_0 = \frac{12 \times 3600 I_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360N}{365}\right) \right] \left\{ \sin(\delta) \sin(L) \frac{\pi}{12} (H_2 - H_1) + \cos(\delta) \cos(L) \left[\sin\left(\frac{\pi}{12} H_1\right) - \sin\left(\frac{\pi}{12} H_2\right) \right] \right\} \quad (2.11)$$

2.1.9. Índice de claridade

O índice de claridade (K_t) é o rácio entre a radiação solar que atinge a superfície, I , e a radiação solar no topo da atmosfera, I_0 , como mostrado na Equação (2.12). O índice de claridade é, desta forma, uma medida da atenuação total da radiação solar na atmosfera terrestre e constitui por isso um parâmetro importante na caracterização, análise, modelação e simulação da radiação solar.

$$K_t = \frac{I}{I_0} \quad (2.12)$$

2.2. Modelos de radiação solar em condições de céu limpo

Neste capítulo serão introduzidos os modelos de céu limpo que foram selecionados e que se caracterizam pela sua simplicidade, necessitando apenas de dados específicos do local e data.

2.2.1. Modelo de Fu e Rich

O modelo de Fu e Rich foi especificamente desenvolvido para aplicações de sistemas de informação geográfica (GIS) e é a base do Solar Analyst, que é parte do Spatial Analyst incorporado no software ArcGIS da empresa ESRI [38]. Como *inputs*, este modelo necessita apenas do dia do ano, ângulo solar zenital e altitude do local em questão. A irradiância solar direta normal, I_{bn} em W/m^2 , é calculada através da Equação (2.13) onde T_b representa a transmissividade da atmosfera cujo valor recomendado e utilizado neste processo é 0,5, m_r representa a massa de ar corrigida com a altitude, Z em metros, calculada através da Equação (2.15) e I_{0n} é a irradiância no topo da atmosfera num plano perpendicular aos raios de Sol, calculada através da Equação (2.14) com uma constante solar I_{sc} de $1366,1\text{W/m}^2$.

$$I_{bn} = I_{0n} T_b^{m_f} \quad (2.13)$$

$$I_{0n} = I_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360N}{365} \right) \right] \quad (2.14)$$

$$m_f = \frac{e^{-0,000118Z - 1,638 \times 10^{-9} Z^2}}{\cos(\Phi)} \quad (2.15)$$

A irradiância difusa, I_d em W/m^2 , é obtida através da Equação (2.16), em que P tem um valor recomendado de 0,3. A irradiância global, I_g , pode ser assim calculada através da Equação (2.17).

$$I_d = I_{bn} \cos(\Phi) \left(\frac{P}{1-P} \right) \quad (2.16)$$

$$I_g = \left(1 + \frac{R}{1-R} \right) I_{0n} T_b^{m_f} \cos(\Phi) \quad (2.17)$$

2.2.2. Modelo HLJ

Este modelo de previsão de radiação solar em condições de céu limpo desenvolvido por Hottel [67] e Liu e Jordan [68] tem em conta o ângulo solar zenital, a altitude do local, Z em km, e o tipo de clima que pode ser enquadrado em quatro tipos definidos na Tabela 2.1. A transmissividade atmosférica, T_b , é calculada através da Equação (2.18) onde os parâmetros a_0 , a_1 e k são calculados para uma atmosfera *standard* com 23km de espessura através das variáveis a_0^* , a_1^* e k^* obtidas respetivamente a partir das Equações (2.19), (2.20) e (2.21) para altitudes inferiores a 2,5km e aplicando fatores de correção de acordo com o tipo de clima do local, $r_0 = a_0/a_0^*$, $r_1 = a_1/a_1^*$ e $r_k = k/k^*$, apresentados na Tabela 2.1.

$$T_b = a_0 + a_1 e^{\frac{-k}{\cos(\Phi)}} \quad (2.18)$$

$$a_0^* = 0,4237 - 0,00821(6 - Z)^2 \quad (2.19)$$

$$a_1^* = 0,5055 + 0,00595(6,5 - Z)^2 \quad (2.20)$$

$$k^* = 0,2711 + 0,01858(2,5 - Z)^2 \quad (2.21)$$

Tabela 2.1 - Fatores de correção para os diferentes tipos de clima [72].

Tipo de Clima	r_0	r_1	r_k
Tropical	0,95	0,98	1,02
Latitude média, verão	0,97	0,99	1,02
Latitude média, inverno	1,03	1,01	1,00
Subártico, verão	0,99	0,99	1,01

A irradiância direta normal é assim dada pela Equação (2.22), em que I_{0n} é a irradiância no topo da atmosfera perpendicular aos raios de Sol, calculada através da Equação (2.14) com uma constante solar I_{sc} de $1366,1W/m^2$.

$$I_{bn} = I_{on}T_b \quad (2.22)$$

Para o cálculo da irradiância difusa foi desenvolvida uma expressão empírica, Equação (2.23), que relaciona o coeficiente de transmissão da radiação direta com o coeficiente da difusa, T_{df} , para dias de céu limpo, permitindo assim o cálculo da irradiância difusa através da Equação (2.24). A irradiância solar global é dada pela Equação (2.25).

$$T_{df} = 0,271 - 0,294T_b \quad (2.23)$$

$$I_d = I_{on}T_{df}\cos(\phi) \quad (2.24)$$

$$I_g = (T_b + T_{df})I_{on}\cos(\phi) \quad (2.25)$$

2.2.3. Modelo ASHRAE

O modelo de previsão de radiação solar ASHRAE é um modelo amplamente utilizado em engenharia para a análise de comportamento térmico de edifícios ou para determinar a irradiação em sistemas solares simples [38]. Este modelo baseia-se em estudos empíricos realizados nos anos 50 e 60 [69] e a irradiância direta normal é calculada através de uma equação simples, (2.26), em função de dois coeficientes mensais, A_m e B_m , apresentados na Tabela 2.2, e do ângulo solar zenital, enquanto que a irradiância difusa, I_d , é dada como uma fração C_m da componente direta normal como mostra a Equação (2.27).

$$I_{bn} = A_m e^{-B_m/\cos(\Phi)} \quad (2.26)$$

$$I_d = C_m I_{bn} \quad (2.27)$$

Este modelo foi desenvolvido para uma atmosfera de referência com 200 aerossóis por cm^3 (partículas), 0,25cm (NTP) de ozono e tendo em conta a variação de humidade atmosférica global anual e conseqüentemente a variação de turbidez através dos coeficientes mensais [4,69]. Eventualmente esta atmosfera básica representa condições típicas presentes em atmosferas não industriais de média latitude com a exceção da espessura de ozono. A irradiância solar global pode então ser calculada através da Equação (2.28).

$$I_g = [\cos(\phi) + C_m]A_m e^{-B_m/\cos(\Phi)} \quad (2.28)$$

Os coeficientes apresentados na Tabela 2.2 são os coeficientes originais desenvolvidos por [69]. Ao longo do tempo foram conduzidos estudos que aperfeiçoaram estes coeficientes quer de uma forma geral quer de acordo com o clima e o local dos dados de observação com os quais os dados obtidos por este modelo foram comparados [4,73,74].

Tabela 2.2 - Coeficientes do modelo ASHRAE para o dia 21 de cada mês [69].

Mês	A_m [W/m ²]	B_m	C_m
Janeiro	1229,475	0,142	0,058
Fevereiro	1213,713	0,144	0,060
Março	1185,340	0,156	0,071
Abril	1134,900	0,180	0,097
Mai	1103,375	0,196	0,121
Junho	1087,613	0,205	0,134
Julho	1084,460	0,207	0,136
Agosto	1106,528	0,201	0,122
Setembro	1150,663	0,177	0,092
Outubro	1191,645	0,160	0,073
Novembro	1220,018	0,149	0,063
Dezembro	1232,628	0,142	0,057

2.2.4. Modelo SMARTS

O modelo SMARTS é um código em linguagem FORTRAN (*FORmula TRANslation*, é uma linguagem de programação de terceira geração desenhada para ser utilizada por engenheiros, matemáticos e outros utilizadores de algoritmos científicos) desenvolvido para diversas aplicações de energia solar em condições de céu limpo. Este é um modelo espectral que, entre outras variáveis, consegue prever valores espectrais e globais de irradiância. As expressões de transmissividade desenvolvidas para este modelo e uma descrição detalhada das suas características pode ser encontrada em [49] tal como referido na Secção 1, sendo aqui apresentadas apenas as definições de base necessárias para a utilização do modelo.

O modelo SMARTS pode ser obtido gratuitamente através da página do NREL [75] e consiste num código fonte compilável e executável assim como diversas bibliotecas e exemplos de ficheiros de *input* e de *output*. Como *input* o modelo necessita de um ficheiro de texto (.txt) que defina as características do local. Este ficheiro está organizado em campos (*cards*) que representam cada linha de texto e, dependendo da complexidade dos cálculos requeridos pelo utilizador, podem ser em maior ou menor número [70]. De seguida serão apresentadas, como exemplo, as *cards* utilizadas para o caso concreto de previsão de valores de irradiância solar global em Évora e Sines.

- ◆ *Card 1: COMNT.* Esta *card* é uma *string* de texto que permite ao utilizador dar um nome ou inserir comentários sobre o modelo ou o local. O texto é inserido entre apóstrofes (') e devem ser inseridos espaços como caracteres de sublinhado (_). Esta *string* tem um limite máximo de 64 caracteres.
- ◆ *Card 2: ISPR.* Esta *card* é necessária para fornecer a informação sobre o local como a pressão e a posição geográfica. Existem diversas opções de dados de *input* sendo aqui utilizada a opção 2 que requer que os valores de latitude, altitude (acima do nível do mar) e elevação (acima do solo) sejam inseridos na *card* seguinte (2a).
- ◆ *Card 3: IATMOS.* Esta *card* define o tipo de atmosfera a utilizar podendo esta ser realista (opção 0) tendo o utilizador de inserir dados como temperatura, humidade, entre outros ou de referência (opção 1), e que foi utilizada neste caso. É então necessário definir qual a atmosfera de referência a utilizar (atmosfera *standard* dos Estados Unidos da América: 'USSA'; verão em latitudes médias: 'MLS'; inverno em latitudes médias: 'MLW'; verão sub-

ártico: 'SAS'; inverno sub-ártico: 'SAW'; tropical: 'TRL'; verão sub-tropical: 'STS'; inverno sub-tropical: 'STW'; verão ártico: 'AS'; inverno ártico: 'AW') na *card* seguinte (3a).

- ◆ *Card 4: IH2O.* Esta *card* define os dados de vapor de água. É possível inserir o valor de água precipitável (opção 0), utilizar o valor de água precipitável definido pelo tipo de atmosfera (opção 1) ou ainda calcular o valor desta variável a partir de dados de temperatura e humidade se estes tiverem sido inseridos na *card* 3 (opção 2). No presente trabalho foi utilizada a opção 1.
- ◆ *Card 5: IO3.* Esta *card* permite definir os dados relativos ao ozono. É possível inserir os dados de altitude e abundância de ozono na atmosfera (opção 0) ou utilizar os dados predefinidos pela atmosfera selecionada na *card* 3 (opção 1). No presente trabalho foi utilizada a opção 1.
- ◆ *Card 6: IGAS.* Esta *card* permite definir as condições de absorção de gases e poluição atmosférica. Para introduzir dados de gases poluentes utiliza-se a opção 0 enquanto que a opção 1 utiliza valores predefinidos pela atmosfera de referência selecionada na *card* 3. No presente trabalho foi utilizada a opção 1.
- ◆ *Card 7: qCO2.* Nesta *card* é necessário inserir o valor de concentração volumétrica do dióxido de carbono (ppmv). No presente trabalho utilizou-se o valor padrão definido pelo autor [70] de 370ppmv.
- ◆ *Card 7a: ISPCTR.* Nesta *card* é selecionado o espectro extraterrestre desejado de uma biblioteca com 10 espectros extraterrestres. No presente trabalho foi selecionado o espectro utilizado por predefinição: espectro sintético desenvolvido pelo autor do código SMARTS [70], opção 1.
- ◆ *Card 8: AEROS.* Nesta *card* é selecionado o modelo de aerossóis a utilizar de uma biblioteca de 12 modelos para diferentes tipos de aerossóis: rural, urbano, marítimo, troposférico ou desértico. Existe ainda a possibilidade de ser o utilizador a definir um modelo de aerossóis. No caso de Évora o tipo utilizado foi rural 'S&F_RURAL' enquanto que para Sines utilizou-se o marítimo 'S&F_MARIT'.
- ◆ *Card 9: ITURB.* Nesta *card* é necessário selecionar o tipo de aerossóis e introduzir dados de turbidez como a espessura ótica dos aerossóis a 500nm, o coeficiente de Ångström, o coeficiente de Schüepp, entre outros. No presente trabalho foi utilizada a opção 0 em que é necessário inserir o valor da espessura ótica dos aerossóis na *card* seguinte sendo utilizado o valor padrão de 0,084.
- ◆ *Card 10: IALBDX.* Nesta *card* é definido o albedo. Este pode ser calculado a partir de um ficheiro desenvolvido pelo utilizador ou pode ser utilizado um dos 64 ficheiros disponíveis cuja descrição é apresentada em [70]. No presente trabalho foi utilizada a opção 41, definida como telhas de barro representativa do meio envolvente próximo dos locais em estudo.
- ◆ *Card 10b: ITILT.* Esta *card* permite a introdução de cálculos para superfícies inclinadas. Como o *output* destes cálculos não é necessário, foi definida a opção 0 não considerando assim este cálculo.
- ◆ *Card 11: WLMN, WLMX, SUNCOR, SOLARC.* Esta *card* define o intervalo espectral (em nm) ao serem definidos os comprimentos de onda mínimo (280nm) e máximo (4000nm) assim como um fator de correção relacionado com a distância da Terra ao Sol, neste caso calculada

pelo modelo com os *inputs* da *card* 17 e a constante solar com um valor predefinido de $1366,1\text{W/m}^2$.

- ◆ *Card* 12: IPRT. Esta *card* permite definir que tipo de *outputs* se pretende. Neste trabalho foi utilizada a opção 0 pois apenas são necessários dados globais. Caso se pretendessem dados espectrais a opção a utilizar seria a opção 1 a 3 dependendo das bandas espectrais pretendidas.
- ◆ *Card* 13: ICIRC. Esta *card* permite simular um radiómetro (piréliometro) modelando a radiação na região circunsolar. Como não é este o objetivo deste trabalho definiu-se a opção 0 não considerando assim este cálculo.
- ◆ *Card* 14: ISCAN. Esta *card* permite ativar um filtro virtual para suavizar os resultados espectrais. No presente trabalho esta funcionalidade não foi utilizada, tendo sido escolhida a opção 0.
- ◆ *Card* 15: ILLUM. Esta *card* permite ativar os cálculos de iluminância. No presente trabalho não foram necessários, tendo sido escolhida a opção 0.
- ◆ *Card* 16: IUUV. Esta *card* permite ativar os cálculos de radiação ultravioleta. No presente trabalho não foram necessários, tendo sido escolhida a opção 0.
- ◆ *Card* 17: IMASS. Esta *card* é utilizada para indicar ao modelo o instante para o qual se desejam os *outputs*. Pode ser inserido o ângulo solar zenital e azimute (opção 0), a altura solar e o azimute (opção 1), a massa de ar (opção 2), o ano, mês, dia, hora, latitude, longitude e fuso horário (opção 3) ou o mês, latitude e intervalo de tempo para *outputs* diários (opção 4). No presente trabalho foi utilizada a opção 3.

Após a criação deste ficheiro de *input* (um ficheiro de exemplo é apresentado no Anexo I), o código é executado e é criado um ficheiro de texto como *output*. Este *output* apresenta os *inputs* utilizados, assim como a posição do Sol, valores de espessuras óticas, dados específicos da data como o dia do ano e o tempo solar aparente, valores das colunas de diversos gases como o dióxido de carbono, metano, oxigénio, ozono, azoto e outros gases vestigiais, o valor da irradiância extraterrestre e valores de irradiâncias direta normal assim como os valores de irradiância direta, difusa e global no plano horizontal. Um exemplo do *output* deste modelo é apresentado no Anexo II.

2.3. Previsão da radiação solar - ECMWF

Existem vários modelos, globais e de área limitada, de previsão numérica do tempo que incluem a previsão da radiação solar à superfície terrestre. Exemplos de modelos de área limitada são o MM5 [76] e o WRF [77] que se caracterizam por prever fenómenos da atmosfera que ocorrem na mesoescala (escala inferior à sinóptica mas superior à microescala). Exemplos de modelos globais numéricos de previsão do tempo são o modelo GFS [78] desenvolvido pelo NOAA constituído por duas componentes, uma de elevada resolução que realiza a previsão do tempo até 8 dias e outra com uma resolução inferior que prevê o tempo para 16 dias, sendo a resolução díspar em termos horizontais (grellhas quadradas de 35km ou 70km de distância entre pontos), verticais (64 camadas de atmosfera) e temporais (previsão a cada 3 horas para as primeiras 192 horas e, posteriormente, a cada 12 horas) e o IFS (*Integrated Forecast System*) desenvolvido pelo ECMWF e utilizado neste trabalho. O IFS compreende várias componentes: um modelo geral de circulação atmosférica, um modelo de ondas do mar, um modelo de superfície terrestre, um modelo geral de circulação oceânica e modelos de perturbação utilizados na assimilação de dados (EDA) e na produção de

previsões probabilísticas recorrendo à técnica designada por “previsão de conjunto” (*ensemble forecast*- ENS), que consiste em realizar um conjunto de previsões para o mesmo período a partir de diferentes condições iniciais, atualmente 50, compatíveis com as observações [79]. Esta técnica de “previsões de conjunto” permite estimar o efeito dos possíveis erros nas análises iniciais e a consequente incerteza nas previsões.

As condições iniciais para os modelos são designadas por análises meteorológicas e são criadas por um processo designado por assimilação de dados. São assimiladas observações ditas convencionais e de deteção remota. As observações convencionais consistem em medições diretas efetuadas em estações meteorológicas, barcos, boias, estações de radiosondagem e aeronaves. As observações não convencionais são obtidas de duas formas: através de tecnologias passivas que medem a radiação emitida ou refletida pela Terra e atmosfera ou através de tecnologias ativas que transmitem radiação e medem a fração dessa radiação que é refletida ou dispersa. A análise 4D-Var utiliza a dinâmica e física do modelo para criar, ao longo de um certo período de tempo (atualmente 12 horas), uma sequência de estados do modelo que se aproximem ao máximo das observações disponíveis, isto é, é uma previsão de pequeno alcance que serve para trazer informação do ciclo anterior ao atual. A previsão HRES (*high resolution 10-day forecast*) é uma previsão de elevada resolução espacial e produz uma descrição detalhada das condições atmosféricas futuras criando, assim, a previsão mais precisa para um certo período de tempo, estimado em 10 dias, das variáveis atmosféricas [79].

O modelo NWP do ECMWF baseia-se num conjunto de equações básicas de conservação de energia, massa e momento linear. Algumas são de diagnóstico descrevendo a relação estática entre pressão, densidade, temperatura e altitude enquanto outras são de prognóstico descrevendo a evolução temporal das componentes horizontais do vento, pressão, temperatura e conteúdo de vapor de água de uma parcela da atmosfera. Equações adicionais descrevem as variáveis hídricas (chuva, neve, água líquida, conteúdo de gelo nas nuvens, entre outras). Existe a opção para a previsão do ozono e outras variáveis passivas. Os processos radiativos, as ondas gravíticas, a turbulência vertical, a convecção, a interação entre as nuvens e a radiação e as transferências entre a superfície e a atmosfera são parametrizados por serem fenómenos de subescala.

As equações do modelo são resolvidas numérica e discretamente no tempo e espaço através de um esquema advectivo semi-Lagrangiano que garante a estabilidade e a precisão numérica mesmo para passos de tempo relativamente elevados necessários para que a previsão seja realizada num período de tempo aceitável [79].

A representação espacial horizontal é feita através de uma grelha de pontos. Devido à convergência dos meridianos, o tempo de processamento pode ser diminuído ao aplicar uma rede Gaussiana reduzida. Isto faz com que o espaçamento este-oeste entre pontos seja aproximadamente constante, diminuindo gradualmente o número de pontos a cada linha de latitude desde os trópicos e em direção aos polos. A resolução vertical utilizada é mais fina junto à superfície e mais esparsa para o topo da atmosfera. Os níveis atmosféricos mais baixos seguem a orografia terrestre.

Uma elevada resolução numérica produz uma maior precisão de cálculo, mas requer um maior tempo computacional. Uma elevada resolução espacial também permite uma melhor representação da topografia como montanhas e linhas de costa assim como o seu efeito nas condições atmosféricas. Esta produz uma descrição mais precisa de estruturas horizontais e verticais facilitando a assimilação de observações. Os fenómenos atmosféricos de menor escala que podem

ser resolvidas por modelos de elevada resolução têm uma previsibilidade de apenas algumas horas, que é aproximadamente o tempo que demoram a ser produzidas as previsões, mas são importantes para as trocas energéticas entre as diferentes camadas da atmosfera.

O aumento da resolução não só beneficia as análises e a previsão da evolução de sistemas de pequena escala associados a ocorrências extremas na atmosfera, mas também a evolução de sistemas de escalas superiores. Para obter a máxima resolução fornecida pelo ECMWF de $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ que corresponde a cerca de 13,5km na direção meridional, o modelo utiliza a interpolação linear dupla [51,79]. Cada técnica de interpolação tem as suas vantagens e desvantagens. Se, por exemplo, a interpolação é feita para um ponto próximo do ponto da grelha, esta terá um valor muito semelhante a este ponto mesmo que este represente um valor extremo numa escala reduzida. A interpolação apenas representa a média do quadrado da grelha de previsão quando o ponto de interpolação se situa no centro deste.

Descrivendo o modelo radiativo com maior detalhe, este resolve os fluxos radiativos de pequeno e grande comprimento de onda utilizando os valores previstos de temperatura, humidade, nebulosidade e climatologias médias mensais de aerossóis e dos principais gases vestigiais (CO_2 , O_3 , CH_4 , N_2O , CFCl_3 e CF_2Cl_2) [80]. O código é baseado no modelo RRTM (*Rapid Radiative Transfer Model*) [81,82] que tem em conta valores de nebulosidade, conteúdo de água líquida, gelo e neve através do método McICA (*Monte Carlo Independent Column Approximation*) [83], o que permite representar as interações da radiação com as nuvens. Este método é uma aproximação que pode ser aplicada em qualquer esquema de transferência radiativa desde que exista um gerador de nuvens [84].

Anteriormente, o esquema radiativo era baseado no modelo de Moncrette [85] que é atualmente utilizado como base para a resolução de esquemas linearizados de transferência de radiação aplicados na assimilação de dados. Atualmente, os fluxos de radiação de grande e pequeno comprimento de onda são resolvidos através do RRTM (RRTM_{LW} e RRTM_{SW} respetivamente). A versão do ECMWF do RRTM_{LW} descreve o espectro de grande comprimento de onda com 16 intervalos espectrais enquanto que o RRTM_{SW} descreve o espectro de pequeno comprimento de onda com 14 intervalos espectrais.

A versão do ECMWF do RRTM_{LW} foi desenvolvida com o objetivo de obter uma precisão no cálculo dos fluxos e taxas de aquecimento consistente com os melhores modelos LBL. Utiliza o método de correlação k (*correlated-k method*) e coeficientes de absorção derivados do modelo LBL da AER (*Atmospheric and Environmental Research, Inc.*), denominado de LBLRTM [86–88]. No modelo do ECMWF não é tida em conta a dispersão de radiação de grande comprimento de onda. A integração da equação de transferência radiativa ao longo da vertical é realizada começando pelo topo da atmosfera e descendo camada a camada para se obter a radiação descendente na superfície. A radiação ascendente é calculada através da integração na vertical desta vez começando pela camada junto à superfície, cuja emissividade e refletividade espectral são conhecidas, e ascendendo, camada a camada, até ao topo da atmosfera. A distribuição espectral da absorção por gases atmosféricos no RRTM_{LW} é tida em conta em [84]. Existem diversas validações com medições espectroscópicas, principalmente do programa ARM (*Atmospheric Radiation Measurement*), dos coeficientes de absorção utilizados no LBLRTM. A versão utilizada pelo ECMWF foi ligeiramente modificada para contabilizar as propriedades óticas das nuvens e a emissividade da superfície definidas para cada uma das 16 bandas para as quais os fluxos de radiação são resolvidos. As propriedades óticas das partículas de gelo presentes nas nuvens são tidas em conta [89], bem como as propriedades óticas das nuvens [90], sendo a espessura ótica das nuvens definida como uma

função dos coeficientes de absorção que variam espectralmente assim como da massa de água e gelo nas nuvens e é inserida na fração de nuvens (nebulosidade) da respetiva camada. Tal como para a radiação de grande comprimento de onda, o modelo para a radiação de pequeno comprimento de onda tem em conta os coeficientes de absorção derivados do LBLRTM sendo os fluxos e taxas de aquecimento calculados para as 14 bandas espectrais contíguas. São tidos em conta os coeficientes de extinção devidos ao vapor de água, dióxido de carbono, ozono, metano, oxigénio, azoto, aerossóis e à dispersão de Rayleigh.

O custo do modelo radiativo em termos computacionais é elevado e, por isso, este modelo apenas é resolvido em determinados passos de tempo e numa grelha espacial de menor resolução. Posteriormente são efetuadas interpolações semi-Lagrangianas para a grelha final de pontos de previsão e para todos os passos de tempo do modelo de previsão. Mais informação sobre a grelha de previsão do modelo radiativo pode ser encontrada em [84].

Como *input* o modelo radiativo do ECMWF necessita de variáveis como a temperatura da superfície, temperatura do ar a 2 metros, temperatura no topo da atmosfera, nebulosidade, conteúdos de gelo e neve para cada camada da atmosfera, raio médio efetivo das gotículas de água parametrizado através do conteúdo de água líquida e concentração de núcleos de condensação de nuvens que, por sua vez, é parametrizada através da velocidade do vento a 10 metros de altura e da altitude, o tipo de aerossóis (marítimo, continental, urbano ou desértico) e o seu ciclo anual [91], concentrações de dióxido de carbono, ozono e gases residuais, albedo e emissividade da superfície e ângulo solar zenital. Mais informação sobre estes *inputs* pode ser encontrada em [84].

O modelo orográfico utilizado deriva de um conjunto de dados com uma resolução de cerca de 1km contendo valores médios de altitude acima do nível médio do mar, a fração de solo e a fração de cobertura por diferentes tipos de vegetação ou outra ocupação do terreno. Estes dados detalhados são agregados obtendo médias orográficas com a resolução necessária. Em áreas montanhosas são utilizados dados orográficos com resoluções superiores ao próprio modelo de previsão para permitir a parametrização dos efeitos das ondas gravíticas assim como a sua influência no fluxo de ar [79].

A análise (4D-Var) é executada quatro vezes ao dia às 00, 06, 12 e 18UTC e as previsões são executadas para os 10 dias posteriores a partir das previsões de análise realizadas às 00 e 12UTC. São disponibilizados dados de previsão horários até à hora 90, passando a ter um passo de tempo de 3 em 3 horas até à hora 144 e de 6 em 6 horas até à hora 240 após a hora inicial da previsão.

3. Recolha e tratamento de dados

Neste capítulo é feita uma descrição da forma como os dados de previsão e medição são recolhidos e posteriormente tratados de maneira a proceder à sua posterior análise.

3.1. Recolha e tratamento de dados de previsão do ECMWF

Para o desenvolvimento deste algoritmo de previsão de radiação solar global é necessário o acesso a uma grelha de dados de previsão climatérica. A grelha escolhida foi a do ECMWF que, para o período considerado, possui uma resolução de $0,125 \times 0,125^\circ$ (aproximadamente 9km). Esta grelha foi selecionada devido à existência de dados de previsão para todo o globo e à existência de uma licença por parte do ICT para acesso à base de dados do ECMWF, permitindo obter dados do histórico de previsão até 10 dias anteriores à data atual.

A obtenção de dados de previsão do modelo de previsão do ECMWF é feita através de uma ligação aos servidores deste instituto. Para isso foi desenvolvido um *script* de programação (Anexo III) que efetua um pedido tendo como *inputs* a data ou datas de início da previsão, a hora de início da previsão (nesta dissertação utilizaram-se apenas as previsões efetuadas às 00UT), o passo de tempo, a resolução da malha de previsão, o local definido por coordenadas de longitude (0° a 360°) e latitude (-90° a $+90^\circ$) e as variáveis pretendidas que são apresentadas na Tabela 3.1. Neste trabalho foram utilizados dados entre 13 de maio de 2015 a 15 de novembro de 2016 estando em formato GRIB. Os ficheiros em formato GRIB são depois convertidos para o formato NetCDF de modo a proceder à sua análise. Estes formatos são muito utilizados em meteorologia e são um veículo eficiente na transmissão de um grande volume de dados armazenados em grelhas através de linhas de telecomunicação de elevada velocidade utilizando protocolos modernos. Ao armazenar informação em código GRIB ou NetCDF os dados tornam-se mais compactos resultando numa transmissão entre computadores mais rápida. NetCDF designa um conjunto de bibliotecas de *software* e formatos de dados independentes do aparelho eletrónico utilizado que permitem a criação, acesso e partilha de dados científicos organizados em vetores. Este formato foi criado pela Unidata [92] e pode ser manipulado com o MATLAB (linguagem de programação de quarta geração e meio de análise numérica) e outros programas.

Nos ficheiros resultantes, todas as variáveis previstas (V) são apresentadas numericamente com um fator de escala (m) e um *offset* (b). Os valores destes atributos são obtidos do ficheiro NetCDF e a Equação (3.1) é utilizada para extrair o verdadeiro valor de cada variável (P) para cada passo de tempo. A existência destes atributos deve-se ao facto de os ficheiros terem de ser compactados por terem elevado tamanho, por exemplo para ficheiros não compactados com três previsões de dez dias de 17 variáveis o tamanho é da ordem dos 113MB. Como apenas foi possível recolher dados de 3 a 5 dias por ficheiro estes foram de seguida concatenados obtendo ficheiros NetCDF mensais através de um *script* de programação desenvolvido (encontra-se um exemplo no Anexo IV).

Por outro lado, devido à existência destes mesmos atributos quer os ficheiros de apenas alguns dias quer os ficheiros mensais apresentam erros nos dados que, embora pouco significativos, devem ser mencionados. Por exemplo, a radiação solar descendente, que é uma grandeza acumulada ao longo da previsão, apresenta uma diferença de cerca de 2kJ/m^2 entre o ficheiro com os dados de 3 dias e o ficheiro mensal para um valor de radiação solar descendente da ordem dos 117MJ/m^2 .

$$P = V \times m + b \quad (3.1)$$

Após a recolha, conversão e concatenação dos ficheiros é necessária a utilização de comandos específicos para extrair os dados necessários dos ficheiros NetCDF para análise em MATLAB. Estes dados são as previsões das variáveis meteorológicas de interesse para os pontos da grelha de previsão mais próximos ao local de medições e para a data e passo de tempo pretendidos desde a hora 1 à hora 72 correspondentes a 3 dias de previsão. As variáveis relativas à radiação solar vêm de forma acumulada ao longo da previsão pelo que é necessário subtrair o valor do passo de tempo anterior ao valor do último passo de tempo a este e assim sucessivamente para determinar os valores horários.

Tabela 3.1 - Variáveis recolhidas do ECMWF.

Nome	Sigla no ECMWF	Unidade	Observações
Longitude	longitude	° Este	Valores vão de 0° a 360°
Latitude	latitude	° Norte	Valores vão de -90° a 90°
Intervalo de tempo	step	h	Valores vão de 1 a 125, sendo horários até 91, de 3 em 3 horas até 109 e de 6 em 6 até 125
Data	date	Dias desde 1900-01-01 00:00:00	
Visibilidade	p3020	m	
Radiação direta à superfície	fdir	J/m ²	Valores acumulados ao longo da previsão
Altura da base das nuvens	cbh	m	Altura a partir da qual a nebulosidade e o conteúdo condensado são superiores a 1% e 1×10 ⁻⁶ , respetivamente
Geopotencial	z	m ² /s ²	
Coluna de água total	tcw	kg/m ²	Inclui vapor, água das nuvens e gelo das nuvens
Nebulosidade	tcc	0-1	
Componente u do vento a 10 metros	u10	m/s	
Componente v do vento a 10 metros	v10	m/s	
Temperatura a 2 metros	t2m	K	
Temperatura de orvalho a 2 metros	d2m	K	
Irradiação solar descendente à superfície	ssrd	J/m ²	Valores acumulados ao longo da previsão
Fluxo líquido de irradiação solar no topo da atmosfera	tsr	J/m ²	Valores acumulados ao longo da previsão
Coluna de ozono total	tco3	kg/m ²	
Fluxo líquido de irradiação solar no topo da atmosfera em condições de céu limpo	tsrc	J/m ²	Valores acumulados ao longo da previsão

Os dados de previsão de humidade relativa do ar e intensidade do vento foram obtidos através dos valores previstos de temperatura do ar e de temperatura do ponto de orvalho a 2 metros de altura,

e dos componentes u (norte-sul) e v (este-oeste) do vento a 10 metros de altura, respetivamente, após o seu *downscaling* espacial.

A humidade relativa do ar é o quociente entre a pressão parcial exercida pelo vapor de água presente na atmosfera e o valor máximo da pressão parcial do vapor de água à temperatura a que o ar se encontra. Para determinar esta propriedade é necessário o cálculo da pressão de vapor saturado (e_s) através da Equação (3.2) denominada por equação de Clausius-Clapeyron, onde e_0 é a pressão de vapor a uma determinada temperatura T_0 (neste caso $e_0 = 611$ Pa e $T_0 = 273,15$ K), L_v é o calor latente de vaporização ($2,453 \times 10^6$ Jkg⁻¹), R_v é a constante dos gases para o vapor de água (461 Jkg⁻¹K⁻¹) e T é a temperatura ambiente (temperatura a 2 metros). É também necessário o cálculo da pressão de vapor (e) à temperatura de orvalho (T_d) através da mesma Equação (3.2). Após o cálculo destas duas variáveis a humidade relativa, HR , em % é calculada através da Equação (3.3).

$$\ln\left(\frac{e_s}{e_0}\right) = \frac{L_v}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right) \quad (3.2)$$

$$HR = \frac{e}{e_s} \times 100 \quad (3.3)$$

Para o cálculo da intensidade do vento, W_s , em m/s os valores previstos dos componentes u e v do vento a 10m foram aplicadas na Equação (3.4).

$$W_s = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.4)$$

3.2. Recolha e tratamento de dados de medição em Évora e Sines

Foram utilizadas observações realizadas em Évora e Sines para avaliar a precisão do modelo de previsão assim como do *downscaling* espacial e temporal a realizar posteriormente. As características dos locais onde foram obtidas as medições encontram-se na Tabela 3.2. As Figuras 3.1 e 3.2 apresentam o local de medições em Évora e Sines e os quatro pontos da grelha de previsão do ECMWF mais próximos ao local de medição, respetivamente.

Tabela 3.2 - Características dos locais de medição utilizados.

Variável	Évora	Sines
Latitude	38°34'04.1"N	37°57'14.7"N
Longitude	7°54'41.3"W	8°51'55.7"W
Altitude	290m	9m

As observações de irradiância solar global, em W/m², e temperatura média do ar, em °C, realizadas em Évora são efetuadas através de um piranómetro da Kipp & Zonen modelo CM6B e de uma sonda de temperatura de platina PT100 situados no observatório do ICT para o mesmo período dos dados de previsão (13 de maio de 2015 a 15 de novembro de 2016). Os dados recolhidos em Sines foram apenas de irradiância solar global, em W/m², obtidos pelo sensor situado na Casa do Estudante em Sines (piranómetro da LI-COR modelo Li-200R) para o período compreendido entre 24 de julho de 2015 e 15 de novembro de 2016. É de salientar que esta localização apresenta um sombreamento do piranómetro num curto período durante a primeira hora do dia devido à existência de uma arribas a leste da localização do sensor. Estas grandezas são medidas com uma frequência de amostragem de 5 segundos sendo registados valores médios, máximos, mínimos e desvios padrão em intervalos

de tempo de 1 minuto, com indicação da hora em UTC. Estes valores médios foram convertidos para J/m^2 (irradiação solar global) e K (temperatura média do ar) sendo posteriormente obtidos os respetivos valores horários e de meia em meia hora para comparação com os dados de previsão.

O piranómetro instalado em Évora é o CM6B da Kipp & Zonen sendo classificado como um piranómetro de primeira classe pela norma ISO 9060:1990 e mede a irradiância solar global através de um sensor térmico (disco negro) que responde à potência total absorvida sendo, teoricamente, não seletivo em relação ao espectro absorvido (335nm a 2200nm) e também sensível a radiação infravermelha com comprimentos de onda superiores a 3000nm que está na origem do zero-offset do instrumento. Ao absorver energia, esta é transformada em calor cujo fluxo existe ao longo da resistência térmica dando origem a uma diferença térmica que é convertida em diferença de potencial e posteriormente em valores de irradiância solar global. Mais informação sobre este sensor e suas características pode ser encontrada em [93].

O sensor de temperatura do ar instalado em Évora é uma sonda de platina PT100 sendo o elemento sensível uma termoresistência de platina caracterizada por uma boa linearidade entre valores de resistência e temperatura permitindo obter os dados de temperatura a partir dos valores medidos de resistência que o objeto impõe à corrente elétrica através de uma função conhecida.

O piranómetro instalado em Sines é o Li-200R da LI-COR e mede a irradiância solar global com uma gama de comprimentos de onda entre 400 e 1100nm através de um foto-díodo de silicone, sendo especialmente desenvolvido para estudos agrícolas, meteorológicos, energéticos e ambientais. É de notar que de acordo com a norma ISO 9060:1990 este sensor apresenta uma menor fiabilidade (segunda classe) que aquele instalado em Évora. Mais informação sobre este sensor e suas características pode ser encontrada em [94].

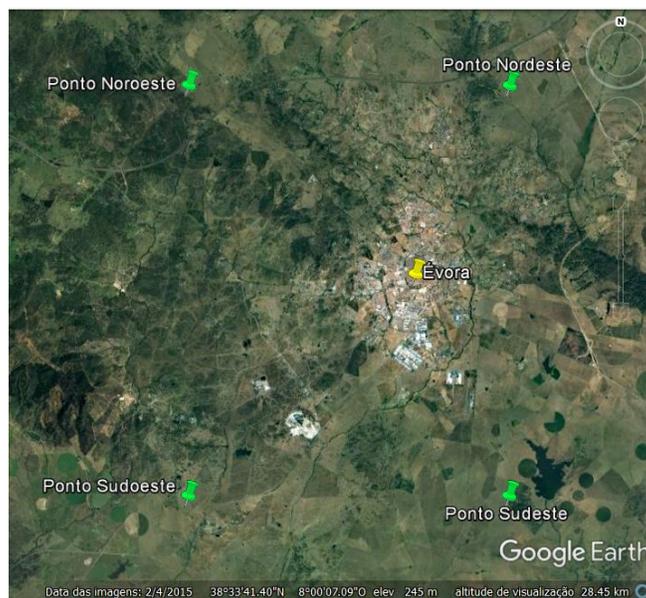


Figura 3.1 – Localização dos 4 pontos da grelha de previsão mais próximos do local de medições e do local de medições em Évora.

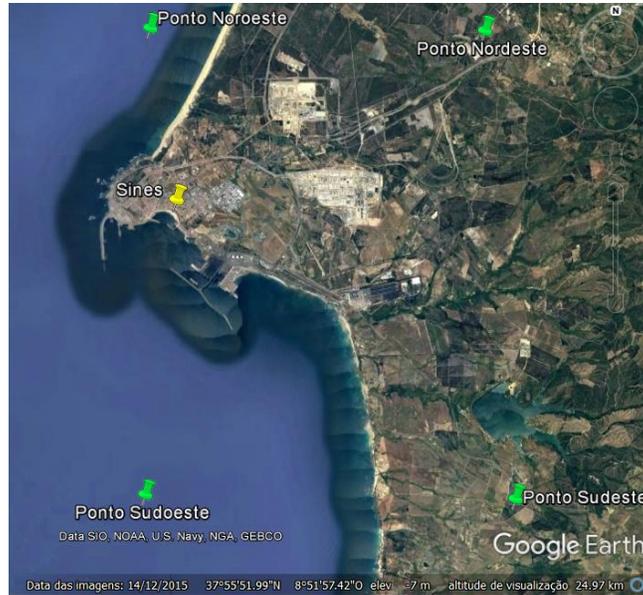


Figura 3.2 – Localização dos 4 pontos da grelha de previsão mais próximos do local de medições e do local de medições em Sines.

A estes dados foi aplicado um algoritmo de correção no caso de falhas na medição existindo uma interpolação linear de valores no caso de faltarem dados num intervalo inferior a 20 minutos e descartando todo o dia no caso de falhas com intervalo de tempo superior.

Os dados de radiação foram ainda corrigidos do zero-offset dos piranómetros, sendo necessário para isso determinar variáveis específicas do local e data, como a hora do nascer e pôr do Sol, já descritas na Secção 2.1., os valores de irradiação solar global horários e de meia em meia hora (I) registados pelo sensor nas horas e meias horas imediatamente antes do nascer do Sol (H_N) e depois do pôr do Sol (H_P), respetivamente, os valores de zero-offset antes (I_{HN}) e após (I_{HP}) o período de dia, os quais são interpolados de acordo com a Equação (3.5) para corrigir os valores de irradiação (I_{Hi}) durante esse período a cada hora ou meia hora H_i . O zero-offset depende das características dos sensores e da sua resposta à troca de radiação com o meio envolvente no espectro de infravermelho e, neste caso, é da ordem de 90 J/m^2 para os valores a um minuto. A Figura 3.3 apresenta uma semana de medições a um minuto sem correção do zero-offset e com esta correção aplicada aos dados de meia em meia hora e horários.

$$I_{\text{corrigido}, H_i} = I_{H_i} - I_{H_N} - \frac{(H_N - H_i) \times (I_{H_N} - I_{H_P})}{H_N - H_P} \quad (3.5)$$

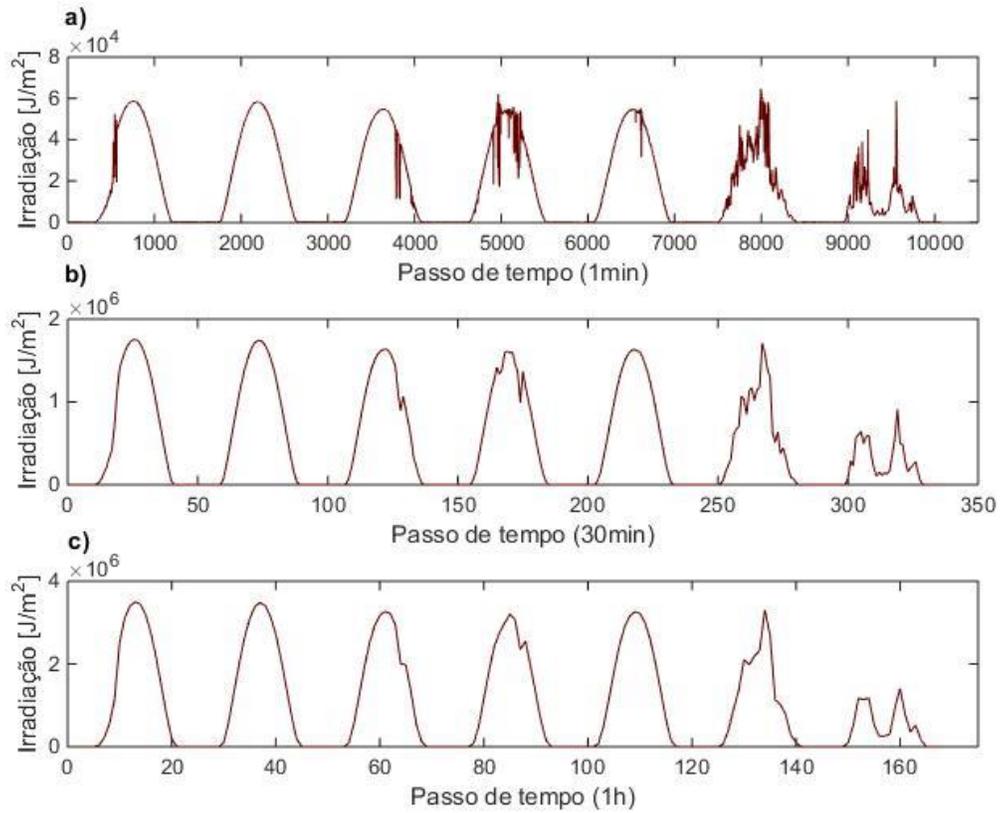


Figura 3.3 – Dados de medição de 1 a 7 de julho de 2016 em Évora. **a)** Dados de irradiação solar global obtidos através da integração dos dados de irradiância medidos pelo sensor de 1 em 1 minuto; **b)** Dados de medição de irradiação solar global de meia em meia hora com correção do zero-offset; **c)** Dados de medição de irradiação solar global horários com correção do zero-offset.

4. Métodos de reescalonamento dos dados de previsão e de cálculo de desvios

Neste capítulo serão apresentados os métodos de cálculo necessários para a concretização do algoritmo como é o caso do *downscaling* temporal e espacial e também a definição das variáveis necessárias para análise do desempenho do modelo de previsão e do próprio *downscaling*.

4.1. *Downscaling* temporal

O algoritmo final terá como *output* valores de meia em meia hora para as primeiras 72 horas de previsão. Para tal, foi necessário desenvolver um método de *downscaling* temporal de valores horários de irradiação solar global e temperatura média do ar para valores de meia em meia hora. Isto foi conseguido através de interpolação numérica preservando os valores horários de irradiação solar global e de temperatura média do ar.

4.1.1. *Downscaling* temporal da irradiação solar global

No caso da irradiação, os valores de irradiação solar global para as primeira e segunda meias horas, $J_{i-1/2}$ e J_i da hora i , com irradiação horária I_i , são aproximados através de duas interpolações lineares com os valores de irradiação das horas seguinte (I_{i+1}) e anterior (I_{i-1}) como mostram os sistemas (4.1) e (4.2), respetivamente.

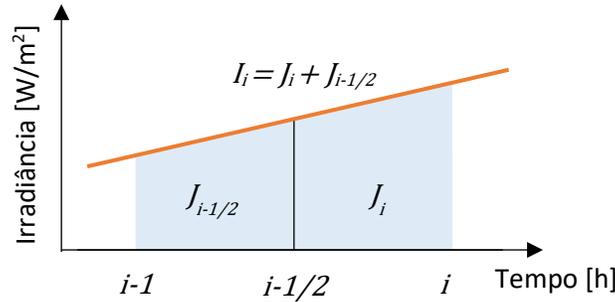


Figura 4.1 – Esquema utilizado para a realização do *downscaling* temporal da irradiação solar global.

$$\begin{cases} J_i^+ = 1/2 I_i \left(1 + 1/2 \frac{I_{i+1} - I_i}{I_{i+1} + I_i} \right) \\ J_{i-1/2}^+ = I_i - J_i^+ \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} J_{i-1/2}^- = 1/2 I_i \left(1 + 1/2 \frac{I_{i-1} - I_i}{I_{i-1} + I_i} \right) \\ J_i^- = I_i - J_{i-1/2}^- \end{cases} \quad (4.2)$$

De seguida é realizada a média destas aproximações de acordo com (4.3) o qual, após substituição de (4.1) e (4.2), se transforma no sistema (4.4).

$$\begin{cases} J_{i-1/2} = 1/2 (J_{i-1/2}^+ + J_{i-1/2}^-) \\ J_i = 1/2 (J_i^+ + J_i^-) \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\begin{cases} J_{i-1/2} = 1/2 I_i \left[1 - 1/4 \left(\frac{I_{i+1} - I_i}{I_{i+1} + I_i} + \frac{I_i - I_{i-1}}{I_i + I_{i-1}} \right) \right] \\ J_i = 1/2 I_i \left[1 + 1/4 \left(\frac{I_{i+1} - I_i}{I_{i+1} + I_i} + \frac{I_i - I_{i-1}}{I_i + I_{i-1}} \right) \right] \end{cases} \quad (4.4)$$

De notar que $J_{i-1/2} + J_i = I_i$, ou seja, o valor horário da irradiação solar global é conservado. É, no entanto, necessário tratar as horas de nascer e pôr do Sol de outra forma devido à sua especificidade. Quando o nascer do Sol ocorre na segunda meia hora da hora do nascer do Sol, então o valor de irradiação solar global para a primeira meia hora é zero enquanto que a segunda meia hora adquire o valor total horário. Para o caso de o nascer do Sol ocorrer na primeira meia hora da hora do nascer do Sol como mostra a Figura 4.2, foram desenvolvidas expressões para o cálculo dos valores de irradiação solar global das primeira e segunda meias horas de modo a incluir o instante de nascer do Sol e a preservar o valor total horário de irradiação solar global (área da figura preenchida que é equivalente a I_i) e considerando uma variação linear da irradiância nesta hora. Através do cálculo das respetivas áreas (irradiação) obtém-se o sistema (4.5) que após resolvido se transforma no sistema (4.8), sendo x a fração de hora do instante de nascer do Sol, assumindo valores entre 0 e 0,5. O valor de irradiância b' é obtido a partir da conservação da irradiação solar dessa hora de acordo com (4.7), enquanto que o valor de irradiância a a meio da hora é obtido por interpolação linear entre o instante de nascer do Sol (irradiância zero) e o final da hora (irradiância b').

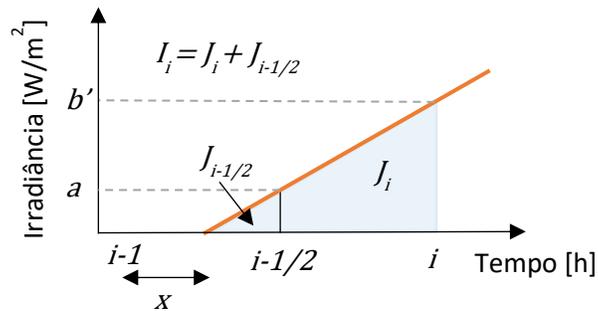


Figura 4.2 – Esquema da hora de nascer do Sol utilizado para a realização do downscaling temporal da irradiação solar global.

$$\begin{cases} J_{i-1/2} = \frac{a(1/2 - x)}{2} \\ J_i = 1/2 a + \frac{1/2(b' - a)}{2} \end{cases} \quad (4.5)$$

$$a = \frac{2I_i}{(1-x)^2} (1/2 - x) \quad (4.6)$$

$$b' = \frac{2I_i}{1-x} \quad (4.7)$$

$$\begin{cases} J_{i-1/2} = \frac{(1/2 - x)^2}{(1 - x)^2} I_i \\ J_i = \frac{3/4 - x}{(1 - x)^2} I_i \end{cases} \quad (4.8)$$

No caso do pôr do Sol, quando este ocorre na primeira meia hora da hora do pôr do Sol, o valor de irradiação solar global da segunda meia hora é zero e a primeira meia hora assume o valor horário de irradiação solar global. Para o caso de o pôr do Sol ocorrer na segunda meia hora como mostra a Figura 4.3, foram igualmente desenvolvidas expressões para o cálculo dos valores de irradiação solar global das primeira e segunda meias horas que, à semelhança do caso do nascer do Sol, conservam o valor total horário de irradiação solar global (área da figura preenchida que é equivalente a I_i) e considerando uma variação linear da irradiância nesta hora. Partindo das respectivas áreas (irradiação) obtém-se o sistema (4.9) que após substituição das expressões para a e b' (com o mesmo significado do caso anterior), se transforma no sistema (4.12), sendo y a fração de hora correspondente ao instante de pôr do Sol, assumindo valores entre 0,5 e 1.

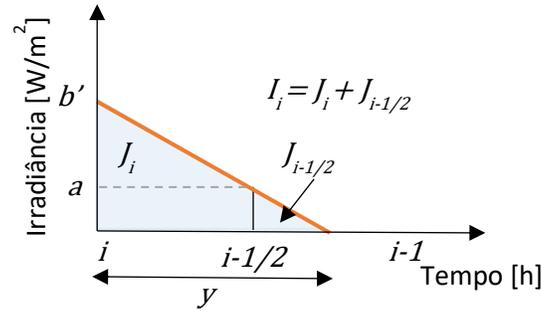


Figura 4.3 – Esquema da hora de pôr do Sol utilizado para a realização do downscaling temporal da irradiação solar global.

$$\begin{cases} J_{i-1/2} = 1/2 a + \frac{1/2(b' - a)}{2} \\ J_i = \frac{a(y - 1/2)}{2} \end{cases} \quad (4.9)$$

$$a = \frac{2y - 1}{y^2} I_i \quad (4.10)$$

$$b' = \frac{2I_i}{y} \quad (4.11)$$

$$\begin{cases} J_{i-1/2} = \frac{y - 1/4}{y^2} I_i \\ J_i = \frac{(y - 1/2)^2}{y^2} I_i \end{cases} \quad (4.12)$$

As frações x e y são determinadas, respetivamente, com base nas horas de nascer e pôr do Sol calculadas como descrito na Secção 2.1.6.

4.1.2. Downscaling temporal da temperatura média do ar

Para o *downscaling* temporal da temperatura média do ar de valores horários para valores de meia hora, é realizada uma interpolação linear entre os valores médios de temperatura das horas seguinte (T_{i+1}) e anterior (T_{i-1}) à hora i , obtendo o declive da reta. Ao aplicar a equação da reta ao valor médio horário de temperatura do ar na hora i são calculados os valores de temperatura média do ar para cada meia hora ($U_{i-1/2}$ e U_i) da hora i como mostram as expressões do sistema (4.13). Desta forma existe conservação do valor médio horário (T).

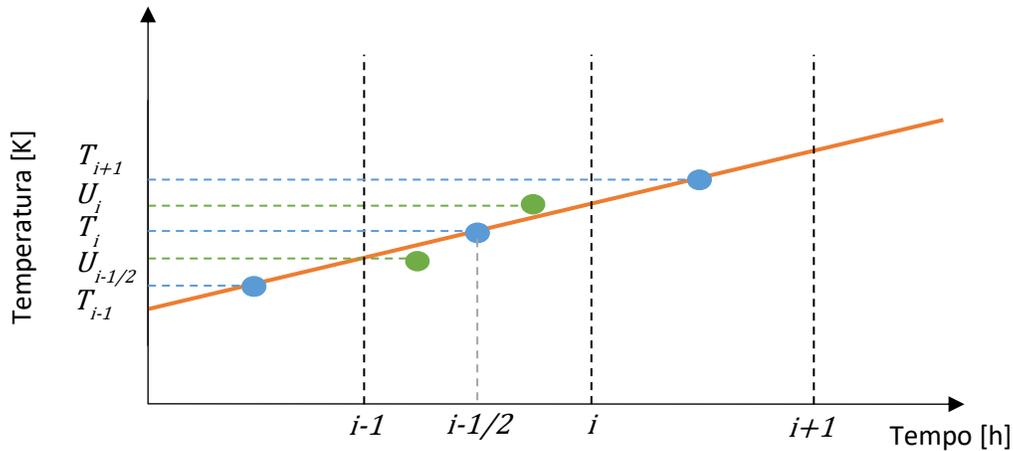


Figura 4.4 – Esquema utilizado para a realização do downscaling temporal da temperatura média do ar.

$$\begin{cases} U_{i-1/2} = T_i - (T_{i+1} - T_{i-1})/8 \\ U_i = T_i + (T_{i+1} - T_{i-1})/8 \end{cases} \quad (4.13)$$

4.2. Downscaling espacial

Como foi referido na Secção 3.1, a grelha de previsão do ECMWF tem uma resolução de $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ sendo necessário proceder a um *downscaling* espacial de modo a obter um valor de irradiação solar global, temperatura média do ar ou outro, mais provável para o local de interesse. Para isso foram analisados vários métodos de *downscaling* espacial.

4.2.1. Pontos da grelha de previsão

A forma mais direta de analisar o modelo é utilizar os valores correspondentes a cada um dos quatro pontos da grelha de previsão mais próximos ao local de interesse de modo a comparar com as medições aí existentes. O mesmo foi feito para os quatro pontos seguintes aos mais próximos com o objetivo de encontrar uma relação entre a distância destes pontos ao local de medições e as respetivas diferenças entre previsões e medições. Este estudo de comparação entre a previsão para cada ponto da grelha de previsão e as medições não realiza um *downscaling* espacial, mas pode permitir a identificação de um método mais adequado para tal. Um esquema dos pontos utilizados pode ser observado na Figura 4.5 .

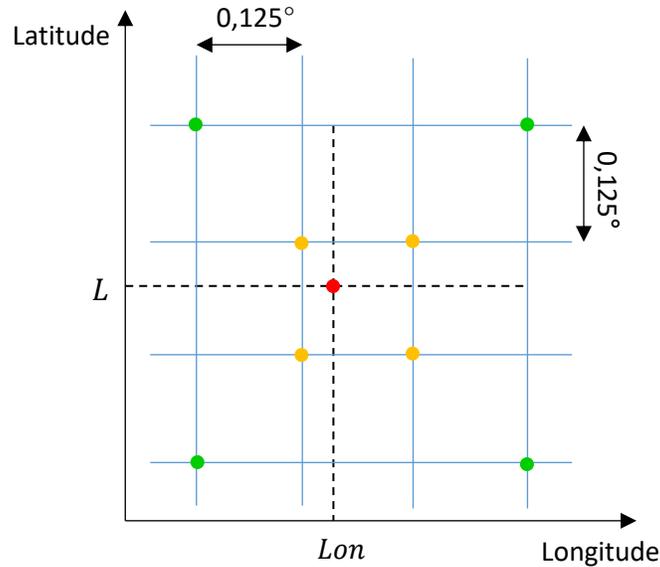


Figura 4.5 – Esquema da grade de previsão do modelo do ECMWF. A vermelho: local de interesse. A amarelo: pontos vizinhos do local de interesse. A verde: pontos seguintes aos mais próximos.

4.2.2. Média aritmética

A forma mais simples de realizar um *downscaling* espacial é fazer uma média aritmética dos valores dos quatro pontos da grade de previsão vizinhos ao local de interesse de acordo com (4.14). Isto também pode ser aplicado para a média dos quatro pontos da grade de previsão seguintes aos mais próximos. Embora seja simples e fácil de aplicar, este método não tem em conta a distância entre pontos da previsão e o local de interesse e o valor da variável a calcular irá sempre ser superior ao valor mínimo e inferior ao valor máximo dos quatro pontos vizinhos.

$$P = \frac{\sum_{i=1}^4 P_i}{4} \quad (4.14)$$

4.2.3. Interpolação linear dupla

O *downscaling* espacial através da interpolação linear dupla do valor dos quatro pontos mais próximos do local de medições é o método aconselhado pelo ECMWF [79] para o cálculo de um valor de previsão mais exato para o local de interesse, sendo, no entanto, sempre inferior ao valor máximo e superior ao valor mínimo encontrado para os quatro pontos. O valor obtido resulta da posição relativa dos pontos da grade no plano em relação ao local de interesse e é calculado, neste estudo, através de uma primeira interpolação linear em latitude (L) através da Equação (4.15), onde P representa o valor da variável em cada ponto da grade. Esta equação é aplicada aos dois pontos a oeste e posteriormente aos dois pontos situados a este do local de interesse obtendo-se o valor de dois pontos com a mesma latitude do local, um a oeste (P_{oeste}) e outro a este deste (P_{este}). De seguida é realizada uma nova interpolação linear em longitude (Lon) com os resultados das equações anteriores através da Equação (4.16) obtendo assim o valor previsto para o local de interesse.

Para a comparação entre previsões e medições do presente trabalho, no caso de Sines, para além da comparação dos valores medidos com interpolação linear dupla, foi também realizada uma

comparação com a interpolação linear simples através da Equação (4.15), visto que os dois pontos a oeste do local de medições se encontram sobre o oceano Atlântico e os dois pontos a este se encontram sobre território continental. Com os valores obtidos pretende-se perceber se a existência de oceano ou terreno no local dos pontos da grelha de previsão tem algum impacto específico na previsão e respetivo *downscaling*.

Os cálculos referidos acima foram também realizados com os quatro pontos seguintes aos mais próximos ao local de medições para análise do modelo espacial.

$$P_{oeste/este} = P_{norte} - (P_{norte} - P_{sul}) \frac{L_{norte} - L_{local}}{L_{norte} - L_{sul}} \quad (4.15)$$

$$P = P_{este} - \frac{Lon_{este} - Lon_{local}}{Lon_{este} - Lon_{oeste}} (P_{este} - P_{oeste}) \quad (4.16)$$

4.2.4. Ponderação pelo inverso da distância

Numa tentativa de incluir as diferenças de altitude entre os pontos da grelha de previsão e o local de interesse foi utilizado um método de *downscaling* através da ponderação pelo inverso da distância. Este método assume que pontos mais próximos terão valores mais semelhantes do que pontos mais afastados. Assim, o valor do ponto da grelha de previsão mais próximo ao local de interesse terá uma maior influência no valor previsto para esse local do que o valor de um ponto mais afastado, ou seja, é assumido que a influência do valor da variável em questão num determinado ponto diminui com o inverso da distância. A taxa a que esta influência diminui depende de um expoente (p), sendo que quanto maior for este expoente menor será a influência de pontos distantes e maior a de pontos próximos [95]. Neste caso foram utilizadas ponderações pelo inverso da distância de primeiro ($p=1$) e segundo grau ($p=2$).

Para calcular as distâncias entre cada ponto da grelha de previsão vizinho e o local de interesse foi necessário obter os valores de geopotencial, G , de cada ponto vizinho dos ficheiros do ECMWF convertendo-os em altitude, Z , em metros através da Equação (4.17). De seguida foi necessário converter as latitudes, longitudes e altitudes em coordenadas cartesianas para realizar o cálculo da distância euclidiana entre os pontos, fazendo assim uma aproximação pois na conversão realizada através das expressões do sistema (4.18), definido pela norma WGS84, a Terra é aproximada a um elipsoide de referência, sendo este definido por um eixo equatorial $a = 6378137,0$ m e um eixo polar $b = 6356752,3142$ m [96], sendo N dado pela Equação (4.19).

O cálculo da distância d entre cada ponto e o local de medição é feito através da Equação (4.20). Com estes valores calculam-se as ponderações pelo inverso da distância de primeiro e segundo graus através da Equação (4.21) onde n é o número de pontos da grelha de previsão utilizados e P o valor do ponto da grelha de previsão. Este método de *downscaling* foi realizado com os quatro pontos vizinhos ao local de medição, os quatro pontos seguintes a estes e os dezasseis pontos da grelha de previsão vizinhos ao local de medição, para análise do desempenho do modelo. Mais uma vez, através deste método o valor calculado para o local de interesse será sempre superior ao mínimo e inferior ao máximo encontrado para os pontos da grelha de previsão utilizados.

$$Z = \frac{G}{9,80665} \quad (4.17)$$

$$\begin{cases} x = (N + Z) \cos(L) \cos(Lon) \\ y = (N + Z) \cos(L) \sin(Lon) \\ z = \left(\frac{b^2}{a^2} N + Z \right) \sin(L) \end{cases} \quad (4.18)$$

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{a^s \cos^2(L) + b^2 \sin^2(L)}} \quad (4.19)$$

$$d_i = \sqrt{(x_{ponto\ i} - x)^2 + (y_{ponto\ i} - y)^2 + (z_{ponto\ i} - z)^2} \quad (4.20)$$

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i^{-p} P_i)}{\sum_{i=1}^n d_i^{-p}} \quad (4.21)$$

4.3. Cálculos das diferenças

Para avaliar o modelo de previsão e métodos de *downscaling* os valores previstos foram comparados aos valores medidos nos locais considerados no presente trabalho através do cálculo de diferenças. Estas podem ser diárias, horárias ou de meia em meia hora consoante os valores utilizados para as calcular sejam diários, horários ou de meia em meia hora, respetivamente. Foram calculadas diferenças relativas através da Equação (4.22), em percentagem, para análise do modelo de previsão e do *downscaling* e também diferenças simples através da Equação (4.23) que permitem ter uma melhor perceção do impacto que estas podem ter na disponibilidade do recurso solar e, posteriormente, da produção de energia de sistemas de energia solar.

$$Diferença\ relativa = \frac{Previsão - Medição}{Medição} \times 100 \quad (4.22)$$

$$Diferença = Previsão - Medição \quad (4.23)$$

Para realizar a análise da influência do ângulo solar zenital no valor das diferenças entre previsão e medição foi necessário o cálculo do ângulo solar zenital horário e de meia em meia hora, onde o ângulo horário, h , utilizado corresponde ao ponto médio da hora ou meia hora em questão em *AST* calculado através de (2.6) após a conversão da hora ou meia hora em *UTC* para *AST* através da Equação (2.2).

Outra variável que deve ser mencionada é o índice de claridade. Este índice foi calculado de forma diária, horária e de meia em meia hora conforme os valores de irradiação solar global e irradiação solar no topo da atmosfera eram diários, horários ou de meia em meia hora através de (2.12). Os valores de irradiação à superfície utilizados para o cálculo do índice de claridade foram tanto os de medição como os de previsão (após um *downscaling* por interpolação linear dupla). O índice de claridade calculado com os dados de medição permite fazer uma melhor avaliação do modelo de previsão, no entanto, no algoritmo a desenvolver, apenas dados de previsão estarão disponíveis e, portanto, perceber como as diferenças entre previsão e medição se alteram com o índice de claridade calculado desta forma é importante.

5. Análise de dados

Neste capítulo é apresentada a análise dos dados de previsão do modelo do ECMWF através da sua comparação com as observações recolhidas e a dependência das diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global em função de variáveis atmosféricas e relativas à geometria Terra-Sol.

5.1. Comparação preliminar entre previsões e medições

Numa primeira fase compararam-se valores de medições e previsões horárias de forma gráfica. Para isso, foram utilizados os valores horários de irradiação solar global das primeiras 72 horas de cada previsão sendo realizado um *downscaling* espacial através de interpolação linear dupla. Os dados horários foram separados por classes de índice de claridade, sendo este calculado com os dados de medição, de acordo com a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Classificação de acordo com o valor de índice de claridade.

Classificação	Intervalo de índice de claridade [%]
Céu limpo	[70;100]
Céu parcialmente nublado	[40;70[
Céu muito nublado	[0;40[

De seguida, apresentam-se as figuras que mostram a densidade de pontos em percentagem para Évora e Sines, para cada um dos 3 dias de previsão em dias de céu limpo. Como se pode observar na Figura 5.1, a distribuição de pontos ocorre mais frequentemente ao longo da função $y = x$ o que demonstra uma boa previsão da radiação solar global no caso de dias de céu limpo. Também se observa um ligeiro aumento da dispersão de pontos para as segundas e terceiras 24 horas de previsão em comparação com as primeiras como seria de esperar (Figuras 5.2 e 5.3). Observa-se ainda que a maior frequência de pontos ocorre próxima do ponto (0,0) pois existem sempre valores baixos de irradiação solar global para as horas próximas do nascer e pôr do Sol.

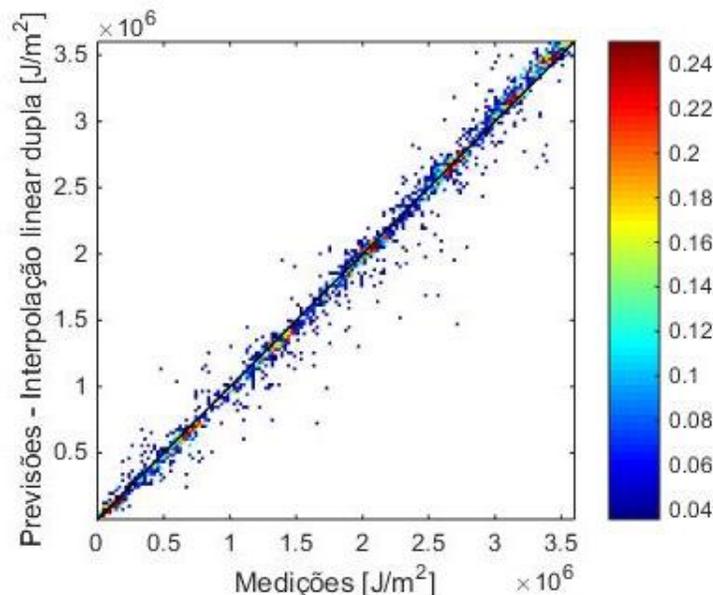


Figura 5.1 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu limpo em Évora para as 24 horas iniciais da previsão. (Densidade de pontos [%]. Número total de pontos:2798).

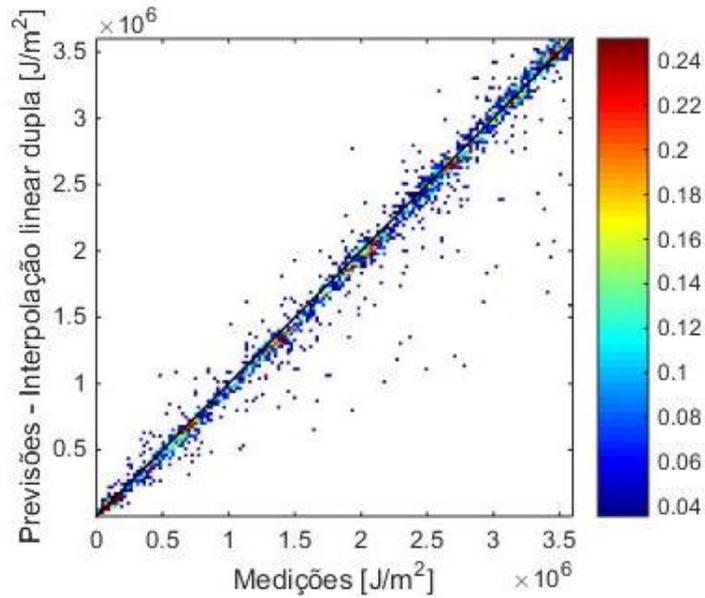


Figura 5.2 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu limpo em Évora para as segundas 24 horas da previsão. (Densidade de pontos [%]. Número total de pontos:2802).

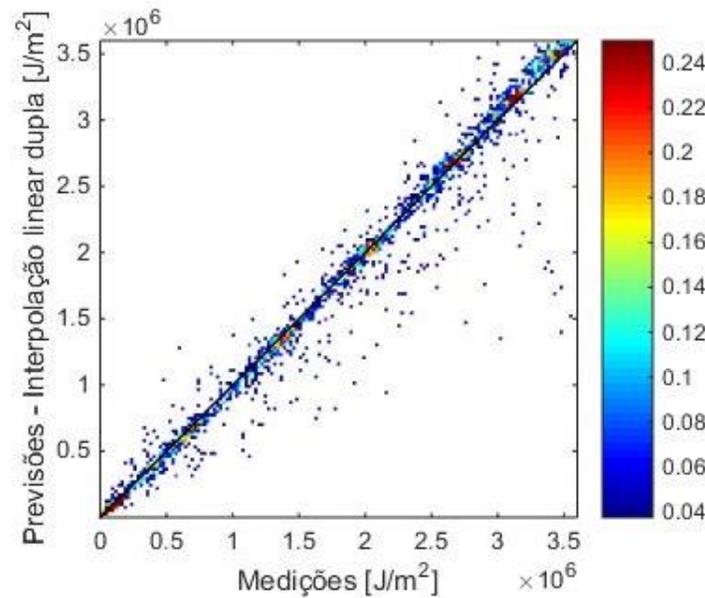


Figura 5.3 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu limpo em Évora para as terceiras 24 horas da previsão. (Densidade de pontos [%]. Número total de pontos:2675).

Foram criadas as mesmas figuras com as observações realizadas em Sines. É de salientar a sombra projetada sobre o sensor de radiação durante a primeira hora da manhã, daí uma previsão de radiação mais elevada do que as medições para valores de irradiação baixos.

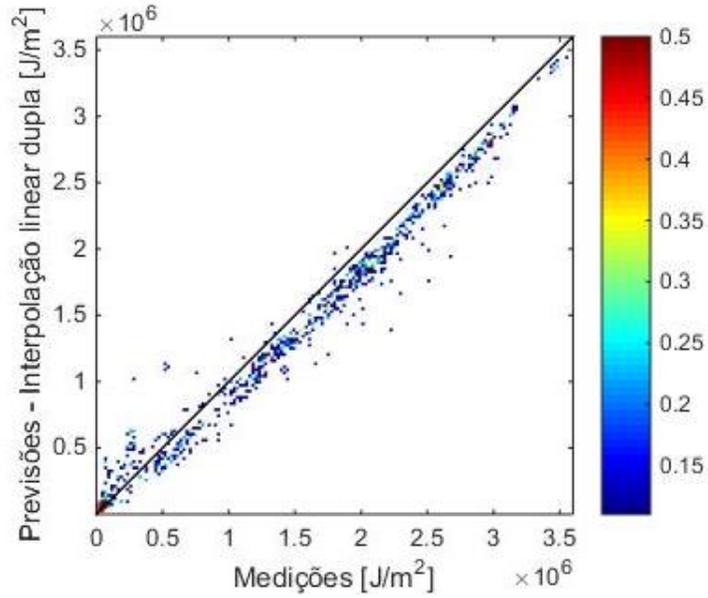


Figura 5.4 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu limpo em Sines para as primeiras 24 horas da previsão. (Densidade de pontos [%]. Número total de pontos: 907).

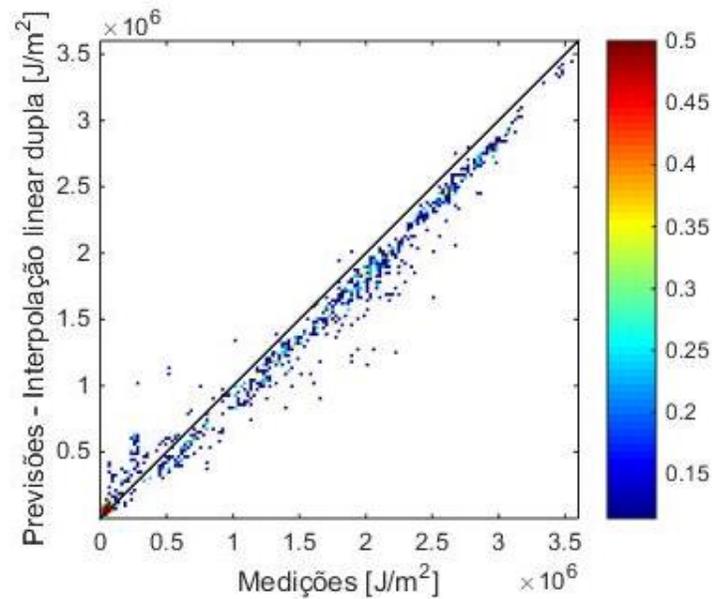


Figura 5.5 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu limpo em Sines para as segundas 24 horas da previsão. (Densidade de pontos [%]. Número total de pontos: 873).

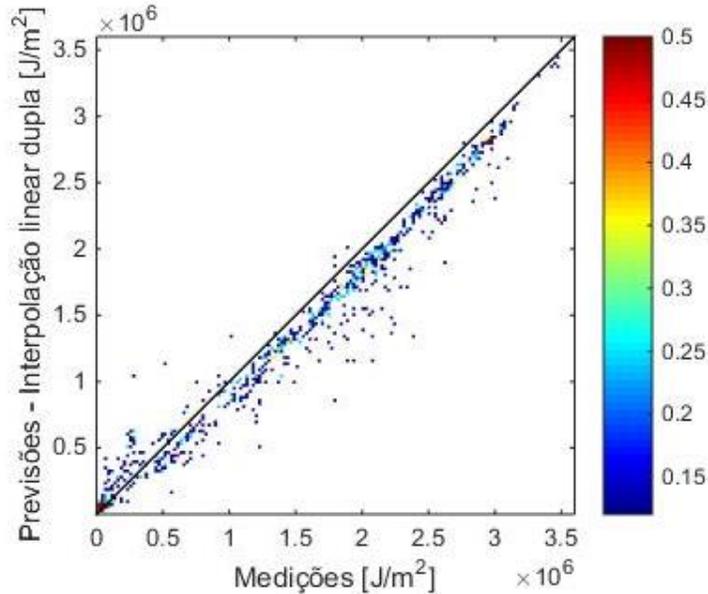


Figura 5.6 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu limpo em Sines para as terceiras 24 horas da previsão. (Densidade de pontos [%]. Número total de pontos: 830).

Analisando as figuras anteriores, observa-se um desvio dos pontos em relação à função $y = x$, mostrando que as previsões para este local tendem a subestimar a irradiação solar global. Nota-se uma maior dispersão para as terceiras 24 horas de previsão quando comparadas com as segundas ou as primeiras.

Foram ainda construídos gráficos para as outras classes de valores de índice de claridade de acordo com a Tabela 5.1, para perceber o impacto que este parâmetro tem na diferença entre previsão e medição quer para Évora quer para Sines.

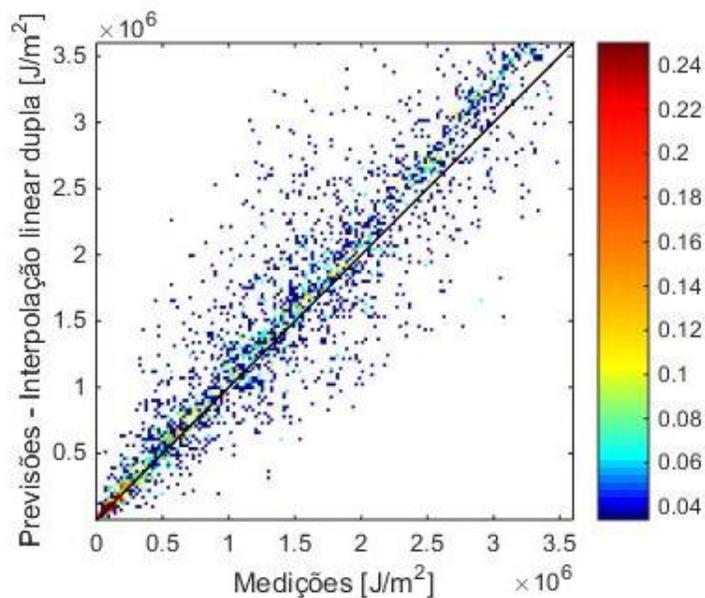


Figura 5.7 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu parcialmente nublado em Évora para as primeiras 24 horas de previsão. (Densidade de Pontos [%]. Número total de pontos:2919).

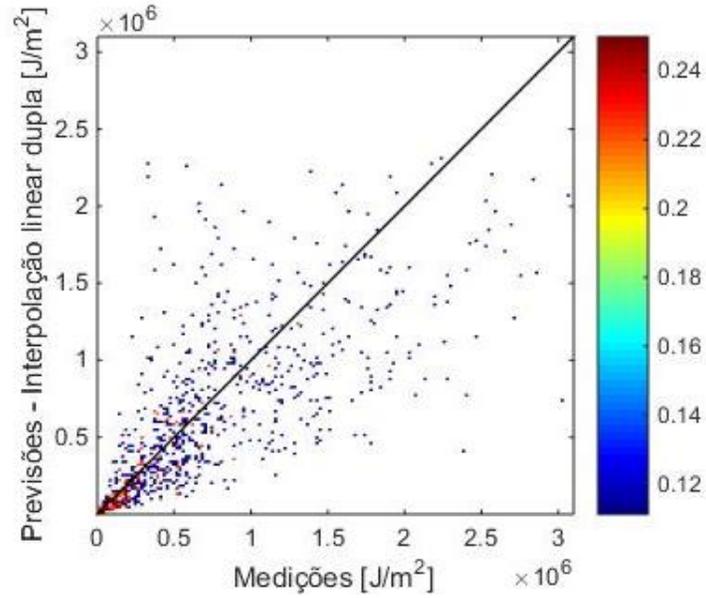


Figura 5.8 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu muito nublado em Évora para as primeiras 24 horas de previsão. (Densidade de Pontos [%]. Número total de pontos: 900).

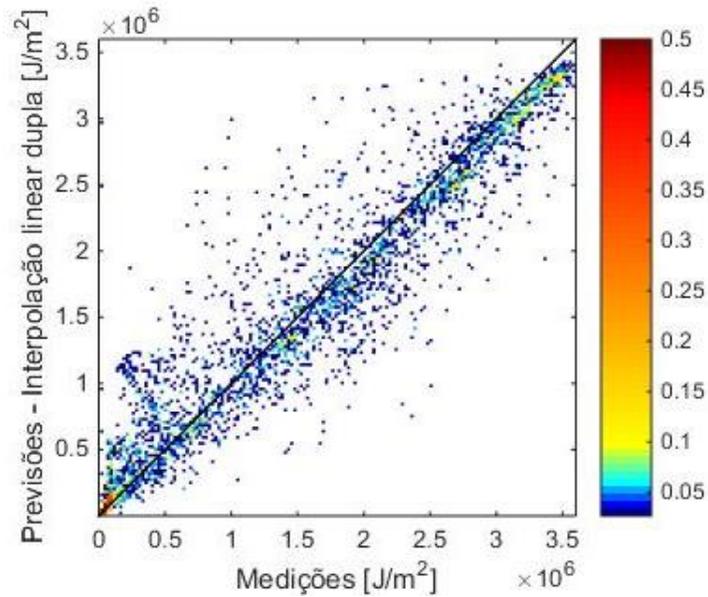


Figura 5.9 – Comparação entre previsão e medição de GHI em condições de céu parcialmente nublado em Sines para as primeiras 24 horas de previsão. (Densidade de Pontos [%]. Número total de pontos: 3773).

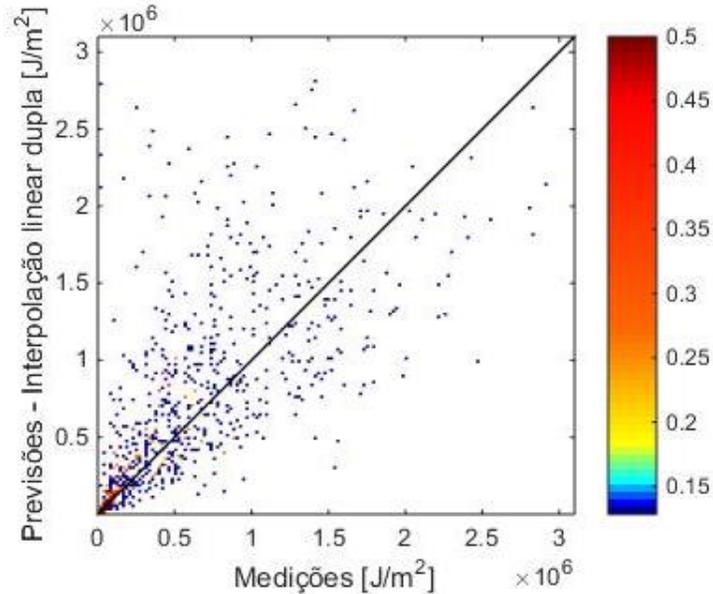


Figura 5.10 – Comparação entre previsão e medição em condições de céu muito nublado em Sines para as primeiras 24 horas de previsão. (Densidade de Pontos [%]. Número total de pontos: 780).

Através da análise das figuras anteriores verifica-se que, tanto para Évora como para Sines, a dispersão tende a aumentar quando o índice de claridade diminui. No caso de Évora, existe um ligeiro desvio em relação à função $y = x$ para valores de irradiação elevados em dias com valores de índice de claridade intermédios, demonstrando uma ligeira sobrestimação de irradiação solar global por parte do modelo de previsão para estas condições. No caso de Sines mantém-se um desvio que mostra uma subestimação da irradiação por parte do modelo de previsão assim como valores de previsão superiores aos medidos para valores de irradiação baixos devido à sombra projetada sobre o sensor durante a primeira hora da manhã. É de notar que o modelo tende a realizar uma previsão mais precisa para Évora do que para Sines, o que se pode dever ao facto de os sensores de medição utilizados serem diferentes para cada local, tendo o sensor localizado em Sines uma menor fiabilidade de acordo com a norma ISO 9060:1990.

No caso de Évora percebe-se ainda que em dias de céu limpo, existe uma maior frequência de pontos abaixo da função $y = x$, o que significa uma subestimação da irradiação nos resultados do modelo de previsão, enquanto que para valores mais baixos de índice de claridade (Figura 5.7) existe maior frequência de pontos acima da linha da função $y = x$, o que significa uma sobrestimação da irradiação nos resultados do modelo de previsão.

5.2. Análise espacial e ao longo de 3 dias de previsão em dias de céu limpo

De seguida é realizada uma análise do *downscaling* espacial, assim como da previsão ao longo dos 3 primeiros dias de previsão, sendo apenas tidos em conta dias de céu limpo de acordo com a classificação da Tabela 5.1, e em que o índice de claridade foi calculado com os dados de medição.

As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam as diferenças diárias relativas médias, calculadas de acordo com a Equação (4.22), e seus desvios padrão para cada um dos locais, para cada dia de previsão e para cada ponto da malha de previsão e método de *downscaling* espacial. Os dados utilizados para esta análise correspondem a 93 grupos de 3 dias seguidos de céu limpo em Évora e a 23 grupos de 3 dias seguidos de céu limpo em Sines observados no período de dados considerado.

Em média, Évora apresenta uma diferença relativa diária de -1,02% com um desvio padrão máximo de 3,56%, o que demonstra uma diferença bastante baixa e, sendo o valor negativo, uma subestimação da irradiação solar para dias de céu limpo de acordo com a análise apresentada na Secção 5.1. Para Sines, a diferença relativa diária em dias de céu limpo é em média de -2,27% com um desvio padrão máximo de 5,10%, o que, mais uma vez, demonstra uma subestimação da irradiação solar global nestas condições. Como já se tinha verificado na Secção 5.1, o modelo de previsão tende a ser mais preciso para Évora do que para Sines em dias de céu limpo, o que é agora também confirmado pela maior diferença relativa diária para Sines.

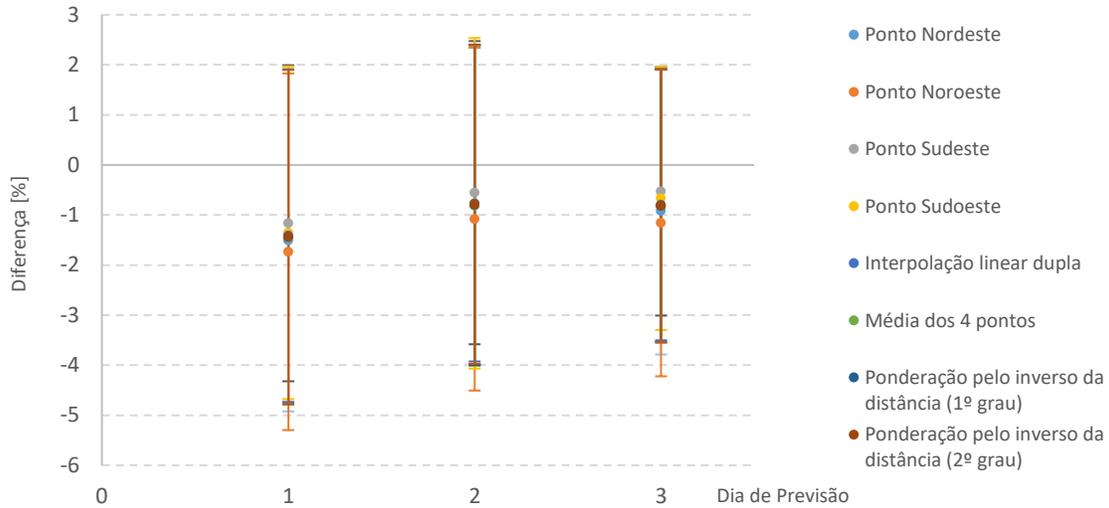


Figura 5.11 – Média das diferenças relativas diárias entre a previsão para cada ponto e calculada através de downscaling espacial e a medição, em condições de céu limpo, em função do dia de previsão em Évora.

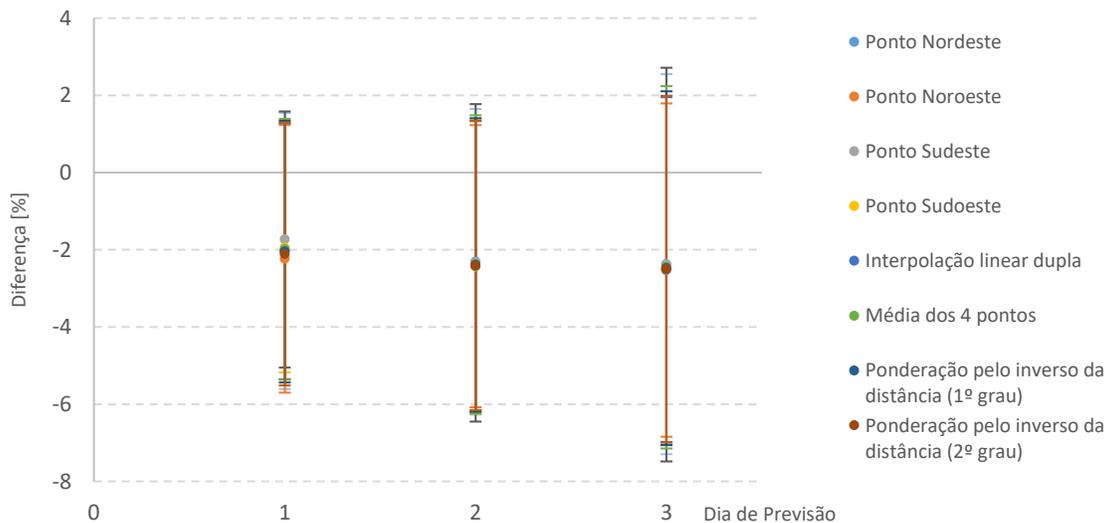


Figura 5.12 – Média das diferenças relativas diárias entre a previsão para cada ponto e calculada através de downscaling espacial e a medição, em condições de céu limpo, em função do dia de previsão em Sines.

No caso de Évora observa-se ainda que, em média, o modelo de previsão tende a ser mais preciso para as segundas 24 horas de previsão (diferença relativa média: -0,80%) do que para as terceiras (diferença relativa média: -0,82%) ou primeiras (diferença relativa média: -1,44%) em dias de céu limpo o que não era expectável. Ademais, parece existir um menor desvio padrão para o terceiro e

segundo dias de previsão do que para o primeiro. Uma possível razão para tal poderia ser o facto de ser mais provável a existência de atenuações da irradiação solar por parte de nuvens ou aerossóis para os extremos de um grupo de 3 dias seguidos de céu limpo, ou seja, o início do primeiro e final do terceiro dias neste caso. Para testar esta hipótese foram seleccionados 32 grupos de 5 dias seguidos de céu limpo, sendo analisados de igual forma o primeiro, segundo e terceiro dias de previsão, correspondentes aos segundo, terceiro e quarto dias do grupo de 5 dias de céu limpo, respetivamente.

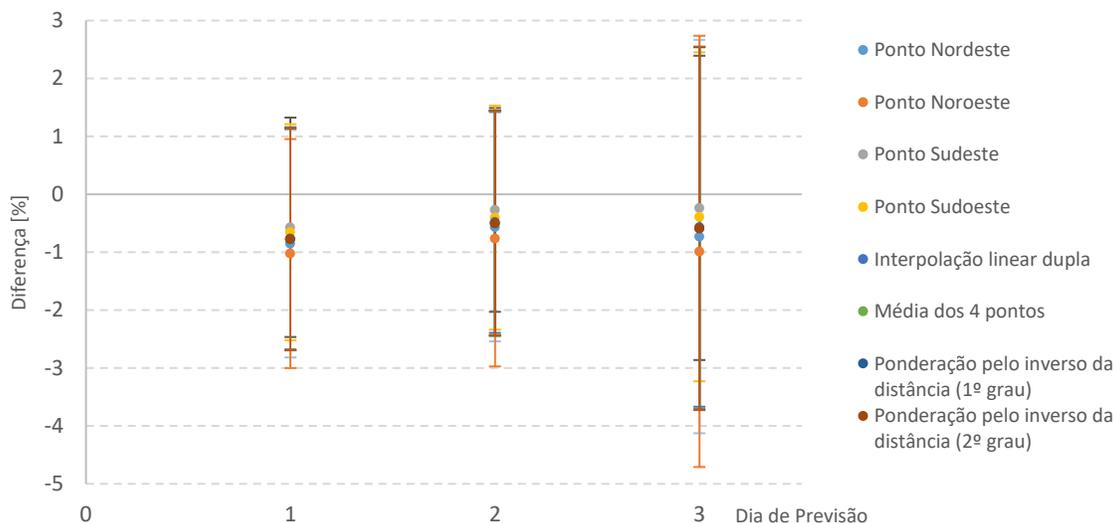


Figura 5.13 – Média das diferenças relativas diárias entre a previsão para cada ponto e calculada através de downscaling espacial e a medição em função do dia de previsão inserido num grupo de 5 dias seguidos de céu limpo em Évora.

Como seria de esperar, pois os dias utilizados têm uma maior probabilidade de possuir índices de claridade mais elevados por estarem inseridos em grupos de 5 dias de céu limpo seguidos, os valores das diferenças relativas diárias diminuíram, com uma diferença relativa média de -0,62% e um desvio padrão máximo de 3,72%. No entanto, as segundas 24 horas de previsão continuam a ter valores mais precisos (-0,50%) do que as terceiras (-0,58%) e primeiras (-0,78%). Sendo assim, pode-se concluir que esta é uma característica dos resultados do modelo para este local e período em estudo, e não se deve à forma de análise. No entanto, verifica-se agora que existe um maior desvio padrão para o terceiro e segundo dias do que para o primeiro, o que confirma a maior dispersão para as terceiras 24 horas seguida das segundas e primeiras verificada na Secção 5.1.

No caso de Sines, Figura 5.12, a previsão para as primeiras 24 horas (diferença relativa média: -1,99%) tende a estar mais próxima das medições do que a previsão para as segundas (-2,38%) ou terceiras 24 horas (-2,45%). Verifica-se ainda que o desvio padrão das diferenças tende a ser superior para o terceiro e segundo dias sendo menor para o primeiro. Quer para Sines quer para Évora, a variação da diferença média ao longo dos três dias de previsão é pequena, podendo estas diferenças médias serem consideradas aproximadamente constantes ao longo desses três dias de previsão em condições de céu limpo.

Os pontos da grelha de previsão utilizados para as análises anteriores foram os 4 pontos vizinhos do local de medições quer para Évora quer para Sines. A posição destes pontos pode ser observada nas Figuras 3.1 e 3.2. No caso de Évora, o ponto mais próximo é o ponto nordeste, seguido pelos pontos sudeste, noroeste e sudoeste. Verifica-se, no entanto, que a diferença média diária de irradiação entre previsão e medição não é menor para o ponto mais próximo ao local de medições

mas sim pela seguinte ordem crescente: i) sudeste; ii) sudoeste; iii) *downscaling* através de interpolação linear dupla; iv) *downscaling* através da ponderação de segundo grau pelo inverso da distância; v) *downscaling* através da ponderação de primeiro grau pelo inverso da distância; vi) *downscaling* através da média dos valores dos quatro pontos; vii) nordeste; viii) noroeste. Não foi, assim, encontrada uma relação entre a posição do ponto da grelha de previsão relativa ao local de medições e o valor da diferença entre previsão e medição, sendo as diferenças entre as diferenças médias para cada ponto da malha de previsão e o método de *downscaling* espacial bastante reduzidas. O mesmo acontece para Sines. O ponto da malha de previsão mais próximo do local de medições é o ponto noroeste seguido pelos pontos sudoeste, nordeste e sudeste, verificando-se uma diferença média diária entre previsão e medição de irradiação solar global pela seguinte ordem crescente: i) sudeste; ii) *downscaling* através da interpolação linear dos pontos em terra; iii) nordeste; iv) *downscaling* através da média dos valores dos quatro pontos; v) *downscaling* através da ponderação de primeiro grau pelo inverso da distância; vi) sudoeste; vii) *downscaling* através da interpolação linear dupla; viii) *downscaling* através da ponderação de segundo grau pelo inverso da distância; ix) *downscaling* através da interpolação linear dos pontos sobre o oceano; x) noroeste.

Foram ainda testadas as hipóteses de utilizar os quatro pontos da malha de previsão seguintes aos quatro pontos mais próximos, quer os seus valores quer os obtidos através dos diversos métodos de *downscaling*, assim como os dezasseis pontos circundantes para um *downscaling* espacial através da ponderação pelo inverso da distância cujos resultados são apresentados nas Figuras 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17.

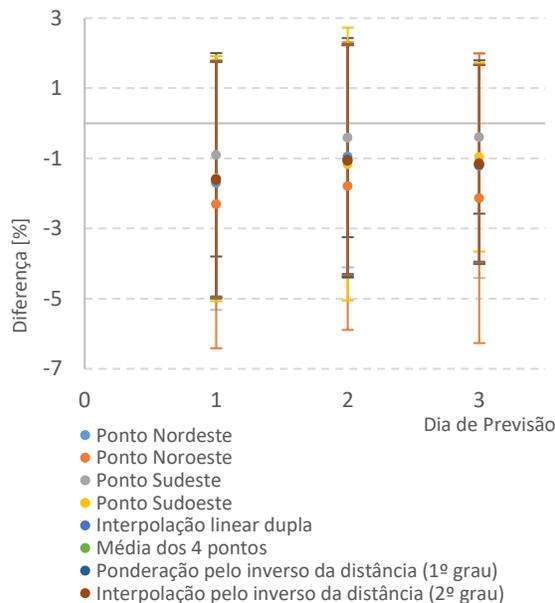


Figura 5.14 – Média das diferenças relativas diárias entre a previsão para cada ponto e calculada através de *downscaling* espacial e a medição, em condições de céu limpo, em função do dia de previsão em Évora (4 pontos seguintes aos circundantes).

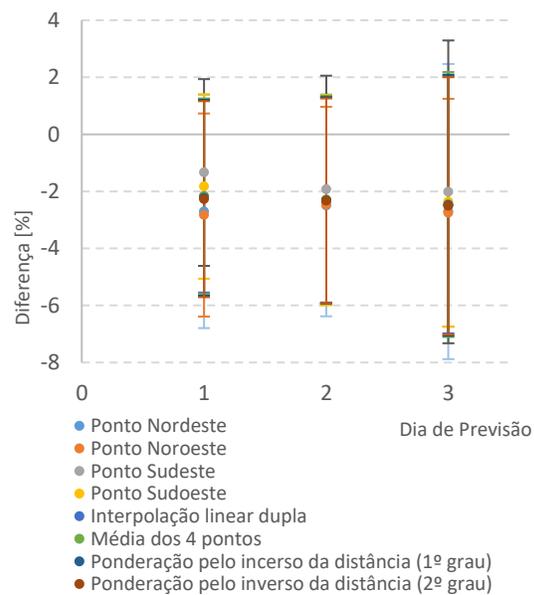


Figura 5.15 – Média das diferenças relativas diárias entre a previsão para cada ponto e calculada através de *downscaling* espacial e a medição, em condições de céu limpo, em função do dia de previsão em Sines (4 pontos seguintes aos circundantes).

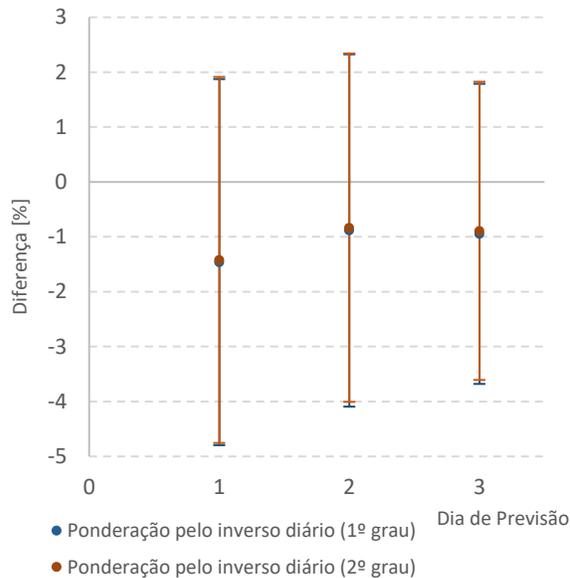


Figura 5.16 – Média das diferenças relativas diárias entre a previsão calculada através de downscaling espacial para os 16 pontos circundantes ao local de medições, em condições de céu limpo, em função do dia de previsão em Évora.

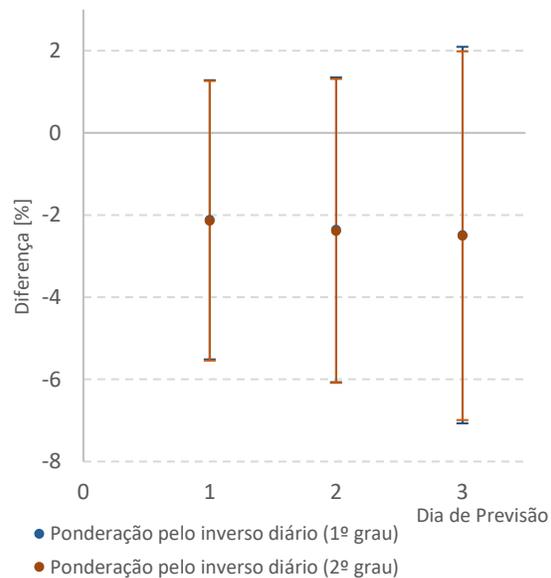


Figura 5.17 – Média das diferenças relativas diárias entre a previsão calculada através de downscaling espacial para os 16 pontos circundantes ao local de medições, em condições de céu limpo, em função do dia de previsão em Sines.

Ao observar os gráficos anteriores verifica-se que, como era expectável, o valor médio das diferenças relativas diárias aumenta quando se utilizam os 4 pontos seguintes aos 4 pontos vizinhos ($-1,29 \pm 4,13\%$ para Évora e $-2,31 \pm 5,31\%$ para Sines) ou os 16 pontos circundantes ao local de medições ($-1,07 \pm 3,33\%$ para Évora e $-2,33 \pm 4,59\%$ para Sines) sendo, ainda assim, valores baixos.

Desta forma, nas análises que se seguem apenas serão utilizados os quatro pontos da grelha de previsão mais próximos ao local de medições e, como as variações entre diferenças calculadas através dos diferentes métodos de *downscaling* espacial são tão pequenas, será utilizado o método de interpolação linear dupla como sugerido pelo ECMWF.

5.3. Influência da posição aparente do Sol e das variáveis atmosféricas

A radiação solar que chega à superfície terrestre é afetada por diversos fatores. Os componentes da atmosfera são bastante relevantes pois a presença destes (gases constituintes da atmosfera, nuvens, aerossóis) atenua, por absorção, reflexão e dispersão, a radiação solar quando esta atravessa a atmosfera. Deste modo, a posição aparente do Sol também é importante pois define a distância através da atmosfera que a radiação tem que atravessar até atingir a superfície. É por estes motivos que, neste capítulo, será apresentado o estudo da influência destas variáveis na diferença entre valores de irradiação solar global previstos e medidos.

Em primeiro lugar serão analisados os fatores da geometria Terra-Sol de modo a obter a sua influência no modelo de previsão assim como no *downscaling* temporal dos resultados e, assim, estimar o seu impacto na previsão da disponibilidade do recurso à superfície terrestre e da produção energética de sistemas de energia solar. Posteriormente, serão analisadas as variáveis atmosféricas previstas pelo modelo de modo a estabelecer as suas relações com as diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global. O objetivo é detetar uma tendência que possa ser corrigida pelo algoritmo sendo, por fim, realizado o *downscaling* temporal dos valores horários de

irradiação solar global. Esta análise foi realizada para as variáveis atmosféricas: temperatura média do ar; humidade relativa; intensidade do vento; nebulosidade; altura da base das nuvens; coluna de água; coluna de ozono; visibilidade. Nesta secção serão apenas apresentados os resultados obtidos para as variáveis atmosféricas que mostram ter uma influência no valor das diferenças (temperatura média do ar, humidade relativa e coluna de água), sendo a restante análise apresentada no Anexo VI.

5.3.1. Índice de claridade

Neste subcapítulo é estudada a influência do índice de claridade nas diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global, assim como o impacto do *downscaling* temporal de valores horários para valores de meia em meia hora.

Foram criados diagramas de caixa que apresentam a mediana, os quartis e valores atípicos das diferenças horárias entre previsões e medições de irradiação solar global, calculadas através do *downscaling* espacial por interpolação linear dupla, em função do índice de claridade calculado com recurso aos dados de medição sendo descartados aqueles correspondentes a índices de claridade inferiores a 10% e superiores a 80% devido à escassez de dados. A estes diagramas foram adicionados pontos com os valores médios de diferença para cada classe de índice de claridade e a sua linha de tendência.

Na Figura 5.18 observa-se que, para Évora, a média das diferenças entre previsão e medição é positiva e decrescente até um índice de claridade de cerca de 45%, mostrando uma sobrestimação da irradiação solar global por parte do modelo de previsão. A partir deste valor a média das diferenças assume valores relativamente pequenos em termos absolutos e negativos, mostrando uma pequena subestimação da irradiação solar por parte do modelo de previsão, da ordem dos -5%. No caso de Sines (Figura 5.19), é observado o mesmo tipo de variação, sendo que a média das diferenças apenas se torna negativa, sendo esta da ordem dos -3%, a partir de um índice de claridade de cerca de 60%. Observa-se ainda que existe uma maior dispersão das diferenças para valores de índice de claridade inferiores.

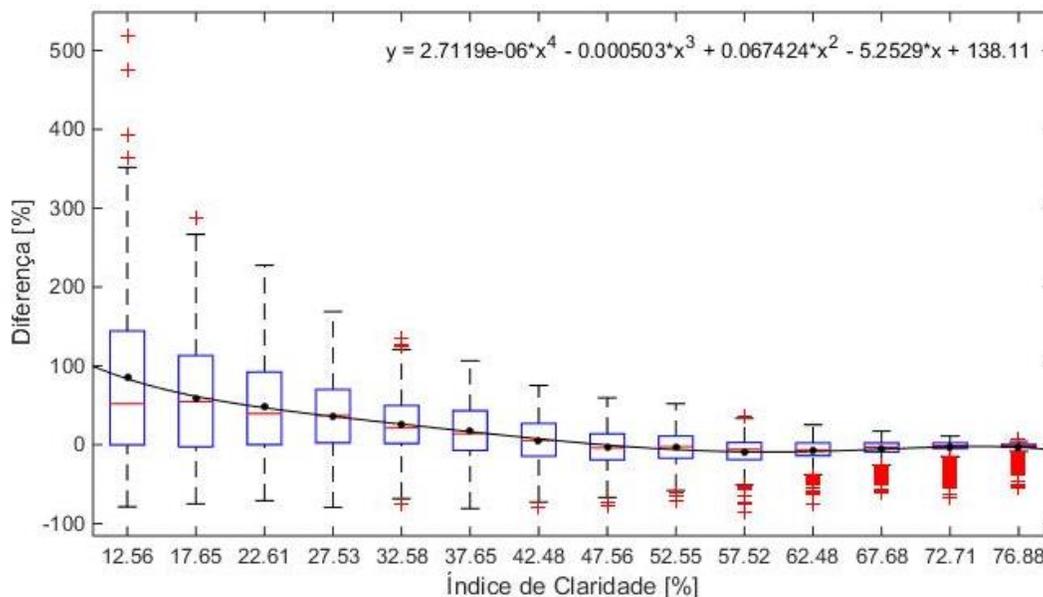


Figura 5.18 – Diagrama de caixa, valores médios e sua linha de tendência dos dados de diferença relativa horária (calculados através de interpolação linear dupla) para cada classe de índice de claridade calculado com as medições em Évora.

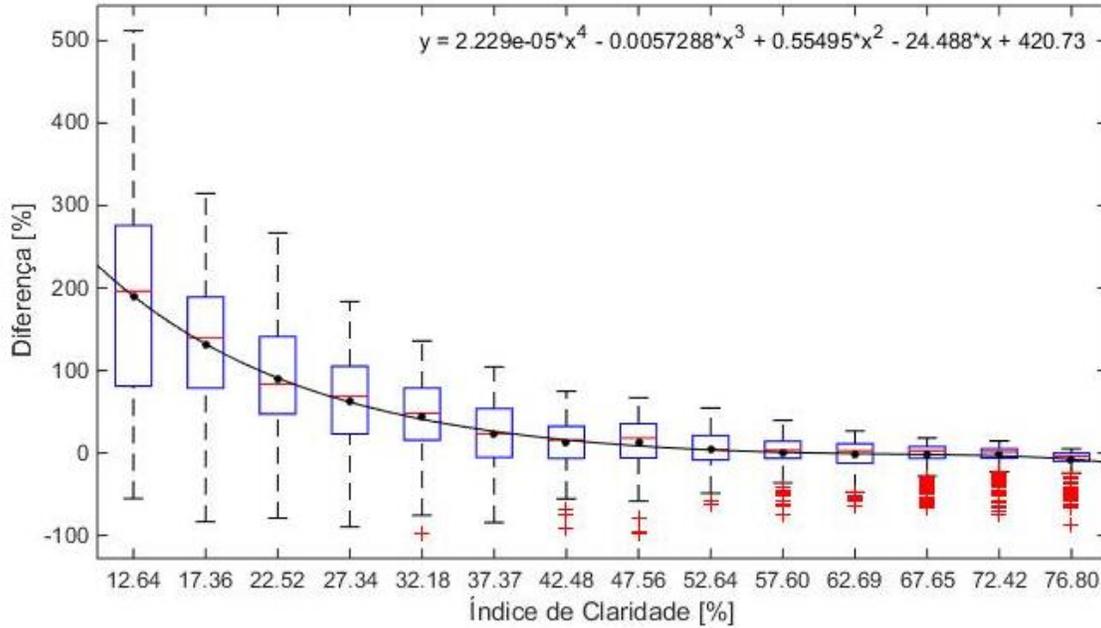


Figura 5.19 – Diagrama de caixa, valores médios e sua linha de tendência dos dados de diferença relativa horária (calculados através de interpolação linear dupla) para cada classe de índice de claridade calculado com as medições em Sines.

O facto de as diferenças relativas horárias mais elevadas existirem para valores de índice de claridade mais baixos pode não se dever apenas a uma maior diferença entre valores previstos e medidos de irradiação solar global, mas também ao facto de, para estes índices de claridade, os valores de irradiação medidos serem bastante baixos o que faz com que a diferença, sendo relativa, adquira valores percentuais elevados.

De seguida são comparados os valores das diferenças relativas horárias e de meia em meia hora.

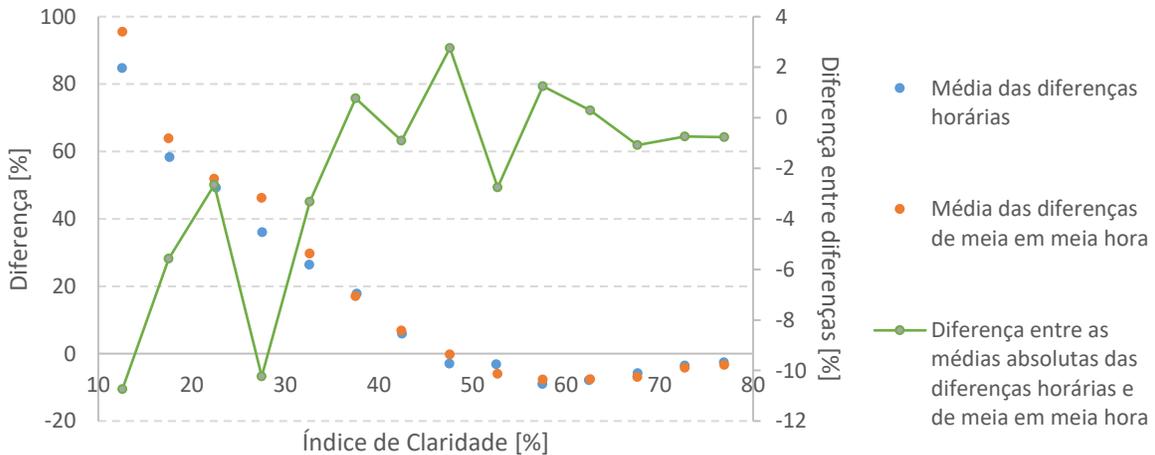


Figura 5.20 – Média e diferença entre as diferenças relativas horárias e de meia em meia hora entre previsão (calculada através de interpolação linear dupla) e medições para cada classe de índice de claridade calculado com as medições em Évora.

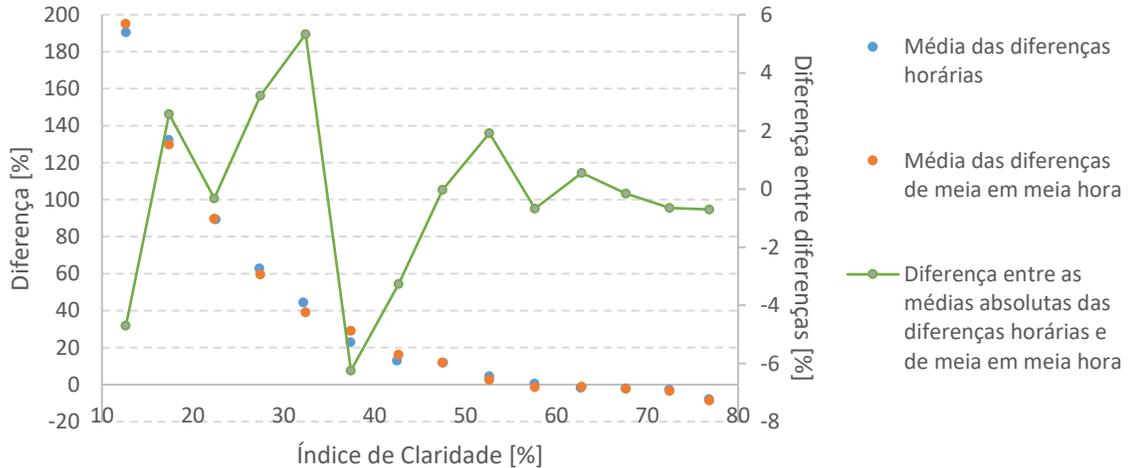


Figura 5.21 – Média e diferença entre as diferenças relativas horárias e de meia em meia hora entre previsão (calculada através de interpolação linear dupla) e medições para cada classe de índice de claridade calculado com as medições em Sines.

As Figuras 5.20 e 5.21 mostram médias de diferença entre previsão e medição horárias e de meia em meia hora bastante próximas com uma diferença média máxima entre diferenças de cerca de -11% para Évora e -5% para Sines existindo ainda índices de claridade para os quais a diferença média absoluta de meia em meia hora é menor do que a diferença média absoluta horária, quando a diferença entre as diferenças médias absolutas horárias e de meia em meia hora é positiva.

Uma vez que o algoritmo de previsão não terá acesso a dados de medição e os dados de previsão serão de meia em meia hora, é necessário estabelecer uma relação entre as variáveis atmosféricas previstas e as diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global. Assim, para se perceber o impacto nas previsões de disponibilidade de recurso e na produção de energia de sistemas de energia solar, foram construídos gráficos semelhantes aos das Figuras 5.18 e 5.19, mas com índices de claridade calculados com os valores de previsão após o *downscaling* através de interpolação linear dupla e valores de diferença de meia em meia hora entre previsão e medição, em J/m^2 .

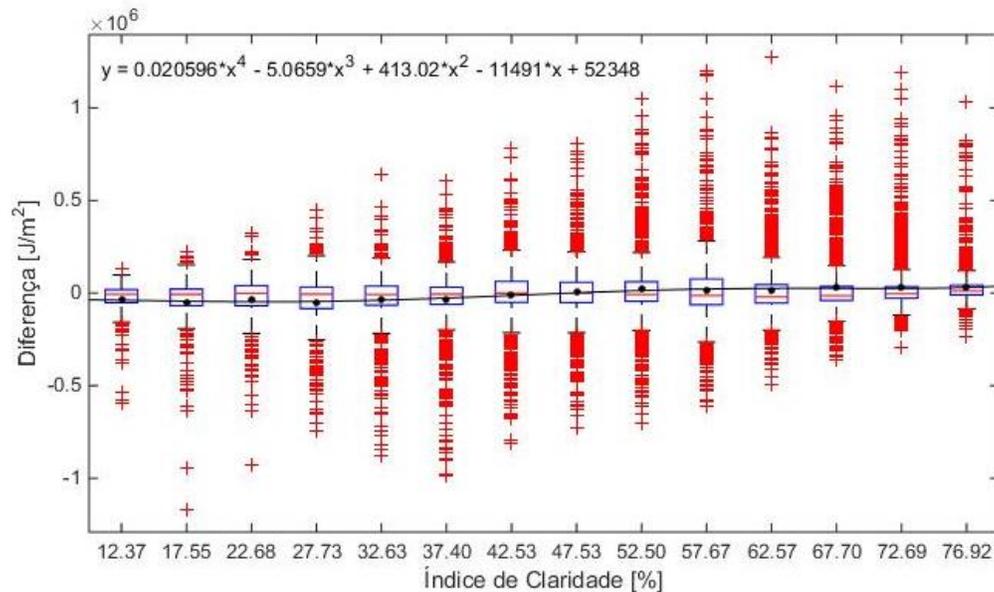


Figura 5.22 – Diagrama de caixa, valores médios e sua linha de tendência dos dados de diferença em J/m^2 de meia em meia hora para cada classe de índice de claridade calculado com as previsões obtidas através de *downscaling* por interpolação linear dupla em Évora.

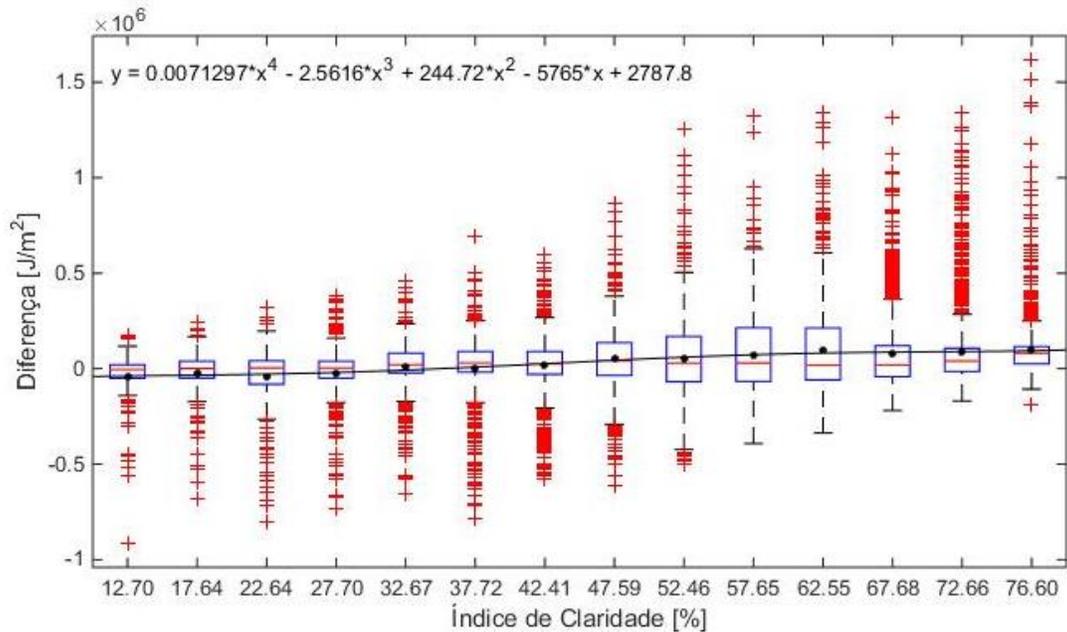


Figura 5.23 – Diagrama de caixa, valores médios e sua linha de tendência dos dados de diferença em J/m^2 de meia em meia hora para cada classe de índice de claridade calculado com as previsões obtidas através de downscaling por interpolação linear dupla em Sines.

A utilização dos dados de previsão em vez dos de medição para o cálculo do índice de claridade tem um grande impacto na forma como as diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global se comportam em função desse mesmo índice de claridade. Enquanto que, para valores de índice de claridade elevados calculados com os dados de medição, o modelo subestima o valor de irradiação solar global, quando o índice de claridade é calculado com os dados de previsão, o modelo aparenta sobrestimar a irradiação solar global. Isto acontece visto que valores de diferença entre previsão e medição superiores resultam em índices de claridade calculados com essas mesmas previsões e medições mais distintos (Equação (2.12)). Estas diferenças elevadas vão assim enquadrar-se em classes diferentes de índices de claridade caso estes sejam calculados com previsões ou medições alterando significativamente a média de diferenças para essas classes de índices de claridade. O impacto da utilização dos dados de previsão ou medição de irradiação solar global no cálculo do índice de claridade nas diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global pode ainda ser observado nos gráficos apresentados no Anexo V.

Observando as Figuras 5.22 e 5.23, verifica-se que, no caso de Évora, o modelo tende, em média, a subestimar o valor de irradiação solar global até um índice de claridade de cerca de 45%, sobrestimando-o para valores de índice de claridade superiores. No caso de Sines, as diferenças de meia em meia hora tendem, em média, a ser superiores e positivas para valores de índices de claridade superiores a 30%, o que demonstra uma sobrestimação do valor da irradiação global. Observa-se ainda que, em média, as diferenças entre previsão e medição são mais elevadas para Sines do que para Évora.

5.3.2. Índice de claridade e ângulo solar zenital

Nesta secção pretende-se verificar se existe alguma dependência das diferenças entre valores de irradiação solar global previstos e medidos com o ângulo solar zenital e o índice de claridade. Inicialmente, foram criados gráficos com as diferenças relativas horárias para Évora e Sines, sendo

o índice de claridade calculado com base na irradiação solar global medida de forma a perceber o comportamento do modelo.

Nas Figuras 5.24 a 5.27 estão representadas as distribuições das diferenças em função do índice de claridade e o ângulo solar zenital. Nestas representações, verifica-se uma maior densidade de pontos para valores de diferenças próximos de zero numa faixa que se inicia em ângulos solares zenitais baixos e índices de claridade entre os 70% e 80% cujo valor, em média, vai diminuindo ligeiramente e cuja dispersão de valores vai aumentando à medida que o ângulo aumenta, quer para Évora quer para Sines.

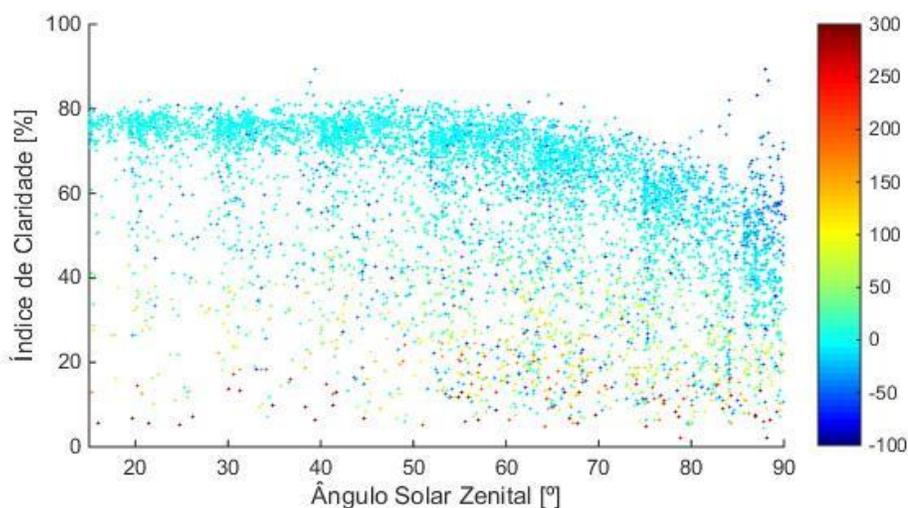


Figura 5.24 – Diferenças relativas horárias [%] entre previsão (calculada através do downscaling espacial por interpolação linear dupla) e medições em função do ângulo solar zenital e do índice de claridade calculado com as medições para Évora.

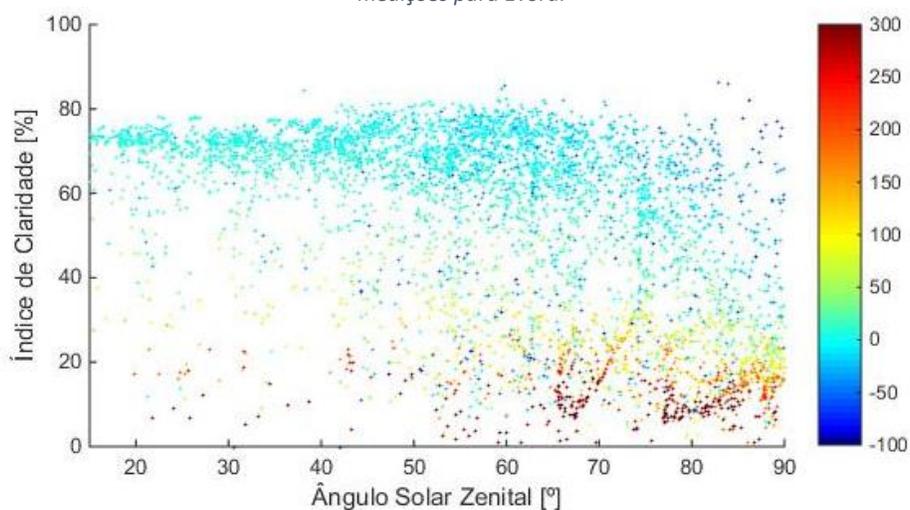


Figura 5.25 – Diferenças relativas horárias [%] entre previsão (calculada através do downscaling espacial por interpolação linear dupla) e medições em função do ângulo solar zenital e do índice de claridade calculado com as medições para Sines.

Nas figuras anteriores são ainda visíveis pontos para valores de ângulo solar zenital próximos de 90° e com valores de índice de claridade superiores a 60% que poderão resultar de erros de medida, em momentos que a radiação solar global é baixa, ou de erros de aproximação no cálculo da irradiação

solar global no topo da atmosfera nas horas de nascer e pôr do Sol, Equação (2.11), e consequentemente no índice de claridade.

Na Figura 5.25 é visível o impacto que o sombreamento do sensor em Sines tem no valor das diferenças relativas horárias. Estas tomam valores elevados para valores de ângulo solar zenital superiores a 65° correspondentes às medições efetuadas durante a primeira hora da manhã. Este efeito é mais perceptível nos resultados apresentados na secção seguinte (Secção 5.3.3) onde são utilizados valores adimensionais do tempo, fração do dia, em vez do ângulo solar zenital.

Tal como na análise realizada na secção anterior, foram também construídos gráficos para as diferenças de meia em meia hora, em J/m^2 , em função do índice de claridade calculado com base na previsão de irradiação solar global e do ângulo solar zenital.

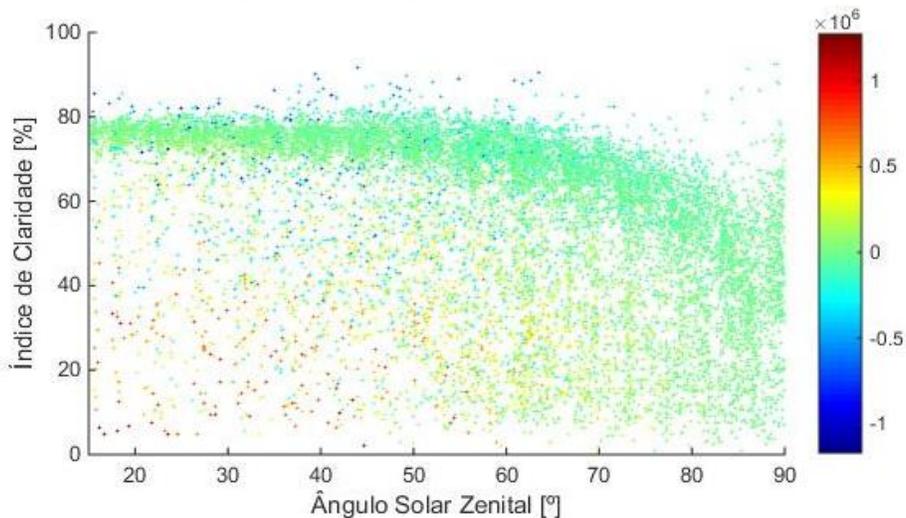


Figura 5.26 – Diferenças de meia em meia hora [J/m^2] entre previsão (calculada através do downscaling espacial por interpolação linear dupla) e medições em função do ângulo solar zenital e do índice de claridade calculado com os valores de previsão para Évora.

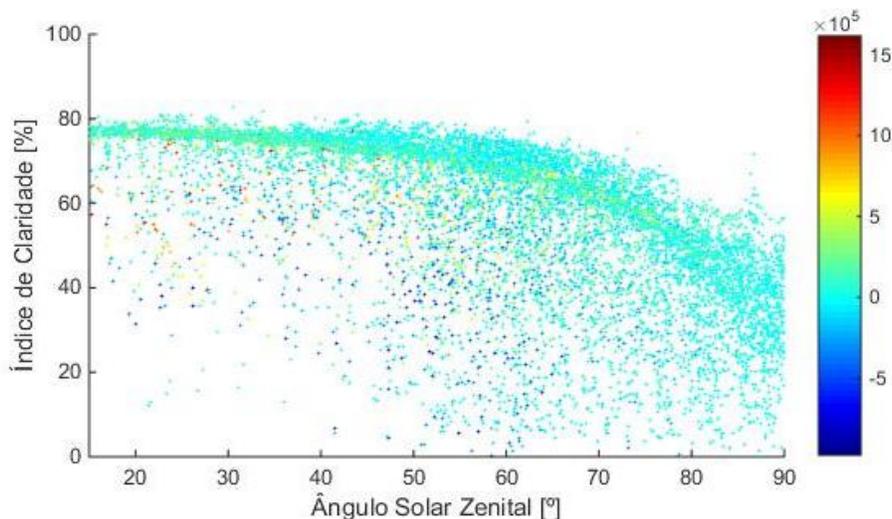


Figura 5.27 – Diferenças de meia em meia hora [J/m^2] entre previsão (calculada através do downscaling espacial por interpolação linear dupla) e medições em função do ângulo solar zenital e do índice de claridade calculado com os valores de previsão para Sines.

Esta análise permite avaliar o desempenho do algoritmo de previsão a desenvolver e o seu impacto na previsão do recurso solar e, conseqüentemente, na produção em sistemas de energia solar. Nas Figuras 5.26 e 5.27, verifica-se novamente uma maior densidade de pontos com valores de diferença próximos de zero na faixa referida anteriormente, não se verificando um padrão para as diferenças de maior magnitude.

Para uma mais fácil avaliação da dependência das diferenças com o índice de claridade e ângulo solar zenital foram construídos gráficos com os valores médios e desvios padrão das diferenças relativas horárias entre previsão (calculada através do *downscaling* espacial por interpolação linear dupla) e medição de cada classe de índice de claridade e ângulo solar zenital.

As Figuras 5.28 a 5.31 apresentam a média e o desvio padrão das diferenças horárias relativas permitindo analisar a resposta do modelo em função do índice de claridade e ângulo solar zenital. Nestes gráficos observa-se novamente a faixa para a qual a média das diferenças e o desvio padrão desta têm valores mais próximos de zero. O modelo de previsão pode assim ser considerado mais preciso para estas situações. Verifica-se também que os valores de diferença máximos correspondem, quer para Évora quer para Sines, a valores de índice de claridade inferiores a 20%. Isto deve-se principalmente aos baixos valores de irradiação solar global medidos para estes índices de claridade que, visto serem utilizadas diferenças relativas, dão origem a valores de diferença elevados.

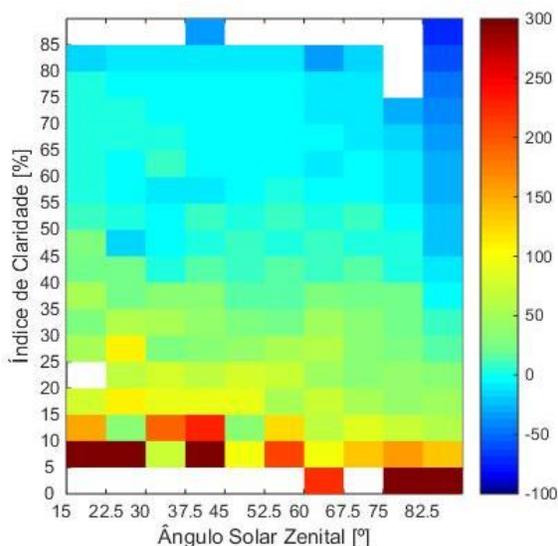


Figura 5.28 – Média das diferenças relativas horárias [%] para cada classe de ângulo solar zenital e índice de claridade calculado com as medições em Évora.

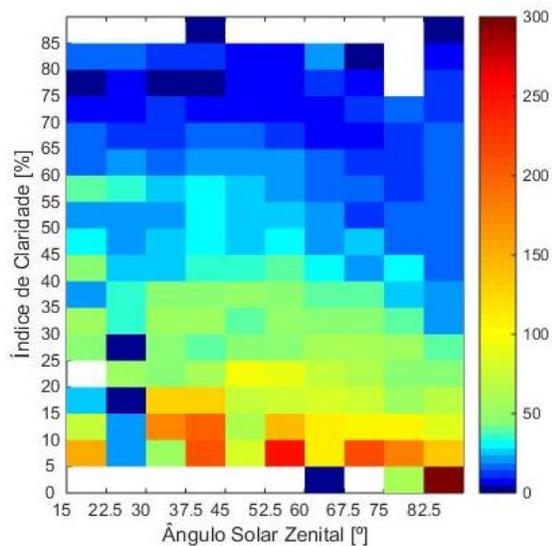


Figura 5.29 – Desvio padrão da média das diferenças relativas horárias [%] para cada classe de ângulo solar zenital e índice de claridade calculado com as medições em Évora.

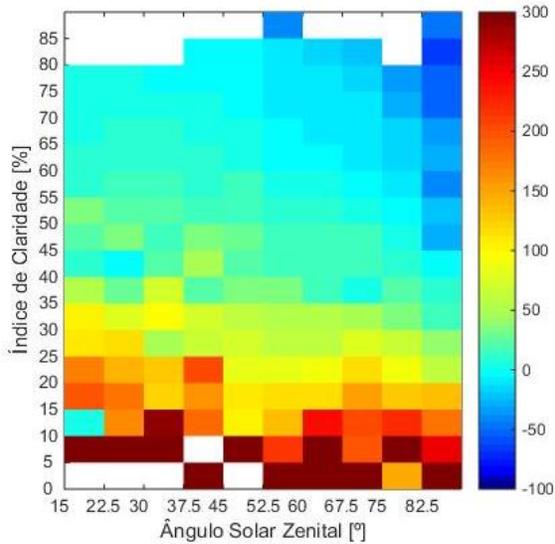


Figura 5.30 – Média das diferenças relativas horárias [%] para cada classe de ângulo solar zenital e índice de claridade calculado com as medições em Sines.

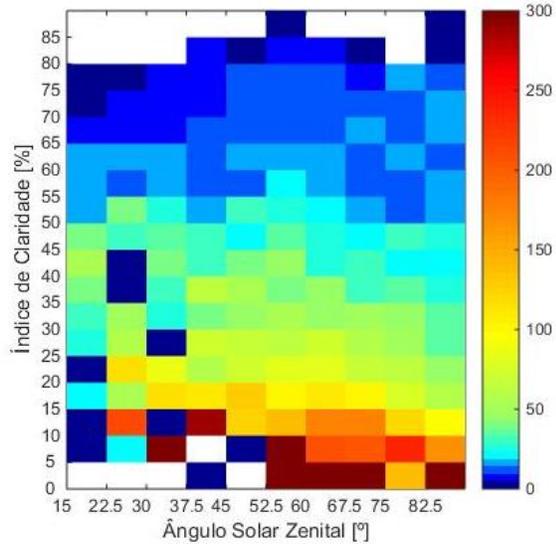


Figura 5.31 – Desvio padrão da média das diferenças relativas horárias [%] para cada classe de ângulo solar zenital e índice de claridade calculado com as medições em Sines.

As Figuras 5.32 a 5.35 apresentam os valores da média e do desvio padrão das diferenças de meia em meia hora, em J/m^2 , entre previsão (calculada através do *downscaling* temporal por interpolação linear dupla) e medições para Évora e Sines para cada classe de índice de claridade (calculado através dos valores previstos por interpolação linear dupla) e ângulo solar zenital.

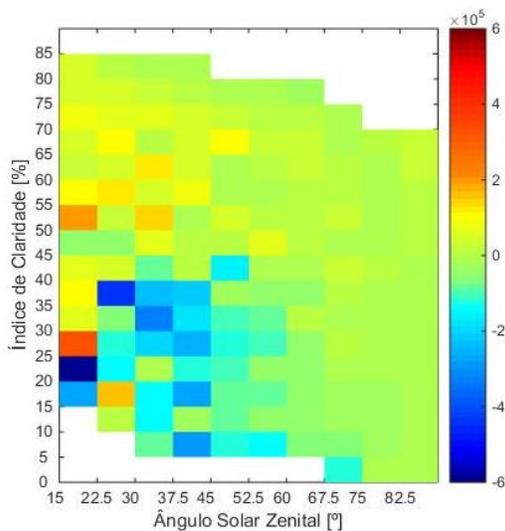


Figura 5.32 – Média das diferenças de meia em meia hora [J/m^2] para cada classe de ângulo solar zenital e índice de claridade calculado com base na previsão para Évora.

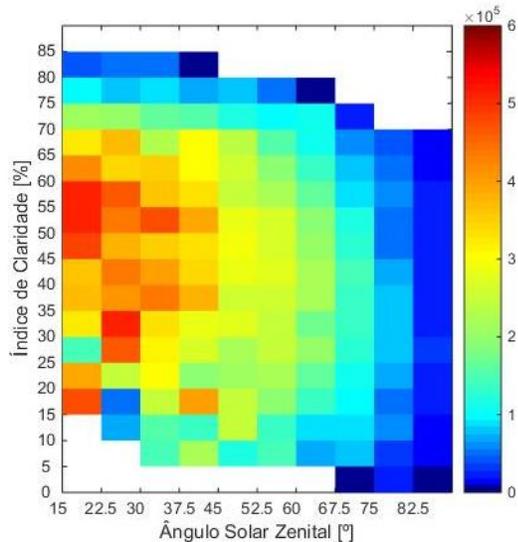


Figura 5.33 – Desvio padrão da média das diferenças de meia em meia hora [J/m^2] para cada classe de ângulo solar zenital e índice de claridade calculado com base na previsão para Évora.

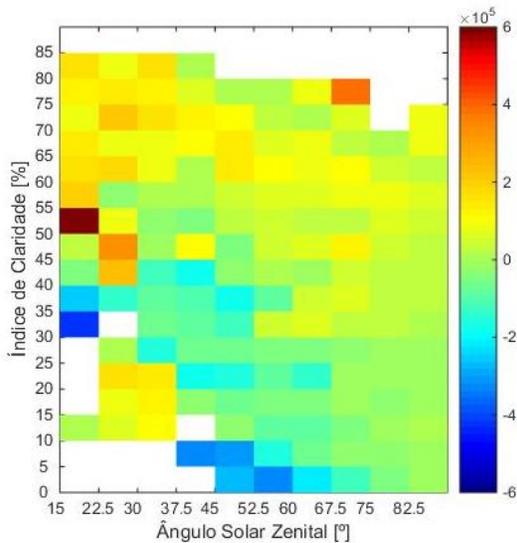


Figura 5.34 – Média das diferenças de meia em meia hora [J/m^2] para cada classe de ângulo solar zenital e índice de claridade calculado com base na previsão para Sines.

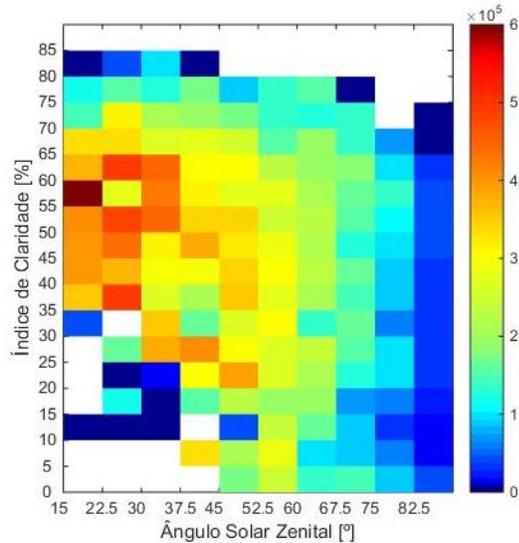


Figura 5.35 – Desvio padrão da média das diferenças de meia em meia hora [J/m^2] para cada classe de ângulo solar zenital e índice de claridade calculado com base na previsão para Sines.

As diferenças mostram ser superiores para valores de ângulo solar zenital inferiores, demonstrando assim um maior impacto na estimativa do recurso solar e da produção de energia em sistemas solares para estas situações mais próximas do meio-dia solar, apesar desses períodos serem caracterizados por uma irradiação solar global mais elevada. No entanto, a média e o desvio padrão das diferenças por classes de ângulo solar zenital e de índice de claridade não são mais elevados para índices de claridade acima dos 70% como poderiam ser devido aos valores de irradiação mais elevados, mas sim para valores intermédios de índices de claridade caracterizados pela passagem de nuvens na atmosfera. Estas são, normalmente, mais difíceis de prever levando a estes valores mais elevados de diferença entre previsão e medição.

5.3.3. Índice de claridade e fração da duração do dia

Outra forma de apresentar os resultados da secção anterior é utilizar uma adimensionalização da hora do dia, que depois é apresentada como uma fração (percentagem) da duração do dia, em vez do ângulo solar zenital. Esta adimensionalização foi realizada de acordo com o descrito na Secção 2.1.7.

As Figuras 5.36 e 5.37 apresentam as diferenças relativas horárias para Évora e Sines, sendo o índice de claridade calculado com base na irradiação solar global medida. Nestas figuras, observa-se que existe uma maior densidade de dados com valores de diferença relativa horária próximos de zero, numa faixa com os mínimos nas horas próximas do nascer e pôr do Sol e máximo para o meio dia solar, sendo o modelo de previsão usado mais preciso para estas condições. É ainda possível observar, mais uma vez, o efeito do sombreamento do sensor localizado em Sines durante a primeira hora da manhã (Figura 5.37).

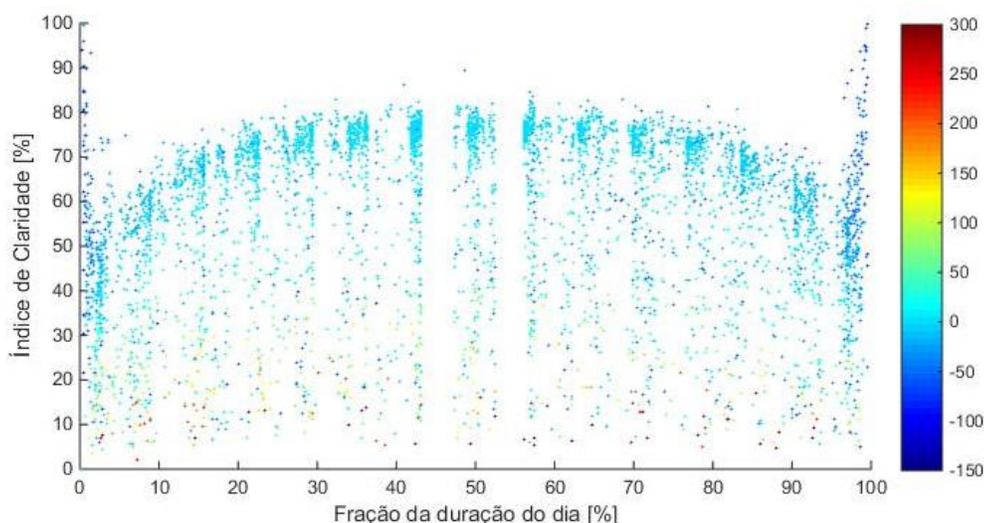


Figura 5.36 – Diferenças relativas horárias [%] entre previsão (calculada através do downscaling espacial por interpolação linear dupla) e medições em função da fração da duração do dia e do índice de claridade calculado com base nas medições em Évora.

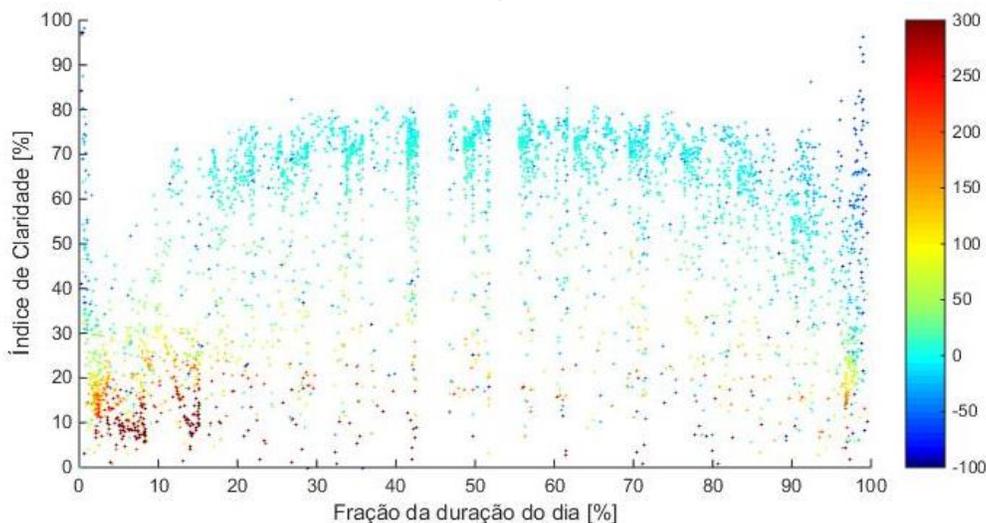


Figura 5.37 – Diferenças relativas horárias [%] entre previsão (calculada através do downscaling espacial por interpolação linear dupla) e medições em função da fração da duração do dia e do índice de claridade calculado com base nas medições em Sines.

De seguida apresentam-se os gráficos das diferenças, em J/m^2 , de meia em meia hora para cada classe de índice de claridade calculado com base nas previsões obtidas através do *downscaling* espacial por interpolação linear dupla e fração da duração do dia, quer para Évora quer também para Sines.

Nas Figuras 5.38 e 5.39 verifica-se, novamente, uma maior concentração de pontos com valores de diferença próximos de zero na faixa referida anteriormente, podendo o modelo ser assim considerado mais preciso para estas condições e demonstrando também a fiabilidade do *downscaling* temporal para valores de meia hora.

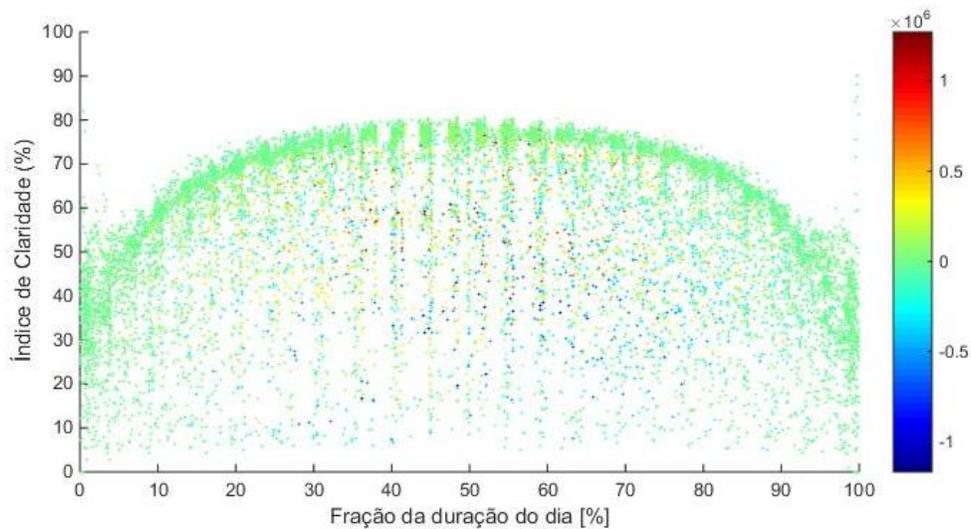


Figura 5.38 – Diferenças de meia em meia hora [J/m^2] entre previsão (calculada através do *downscaling* espacial por interpolação linear dupla) e medições em função da fração da duração do dia e do índice de claridade calculado com base na previsão para Évora.

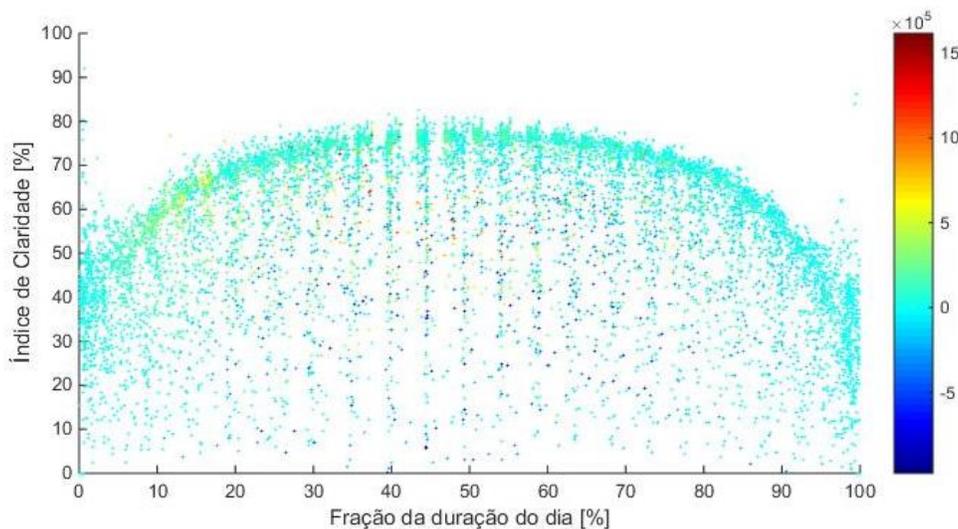


Figura 5.39 – Diferenças de meia em meia hora [J/m^2] entre previsão (calculada através do *downscaling* espacial por interpolação linear dupla) e medições em função da fração da duração do dia e do índice de claridade calculado com base na previsão para Sines.

As aparentes lacunas de pontos ao longo do dia nas Figuras 5.36, 5.37, 5.38 e 5.39 devem-se ao carácter horário ou de meia em meia hora dos dados de previsão e medição e da sua adimensionalização que executa um reescalonamento do eixo dos xx para dias com diferentes durações.

De forma semelhante ao que foi apresentado na secção anterior, também foram construídos gráficos com os valores médios e desvios padrão das diferenças relativas horárias entre previsão (calculada através do *downscaling* espacial por interpolação linear dupla) e medição de irradiação solar global para cada classe de índice de claridade calculado com base nas medições de irradiação solar global e fração da duração do dia.

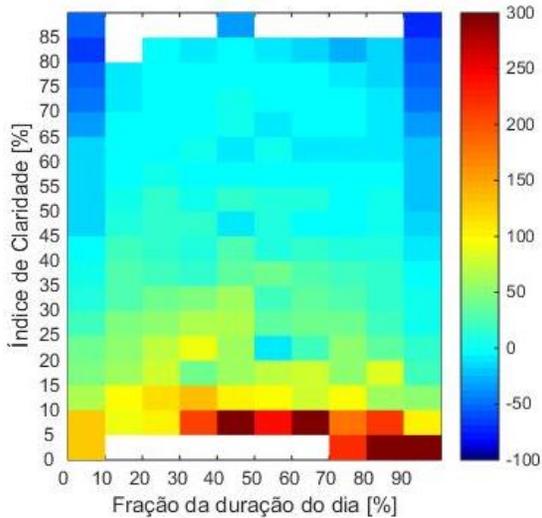


Figura 5.40 – Média das diferenças relativas horárias [%] para cada classe de fração da duração do dia e índice de claridade calculado com base nas medições em Évora.

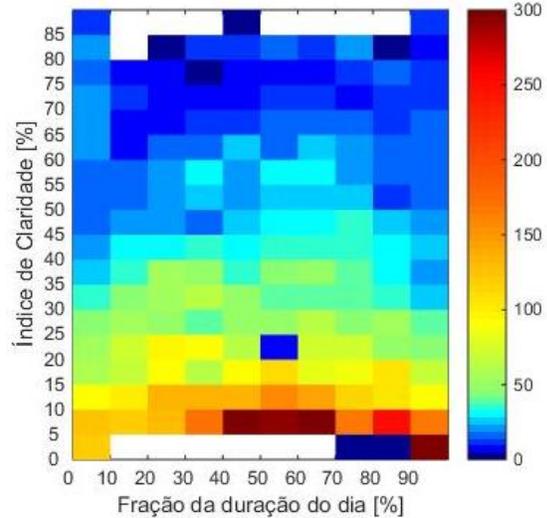


Figura 5.41 – Desvio padrão da média das diferenças relativas horárias [%] para cada classe de fração da duração do dia e índice de claridade calculado com base nas medições em Évora.

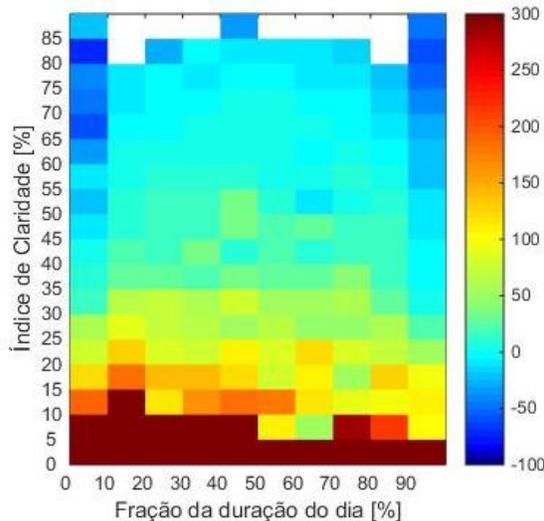


Figura 5.42 – Média das diferenças relativas horárias [%] para cada classe de fração da duração do dia e índice de claridade calculado com base nas medições em Sines.

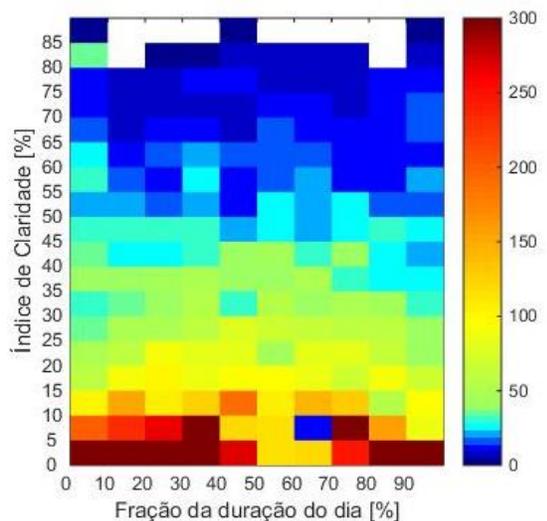


Figura 5.43 – Desvio padrão da média das diferenças relativas horárias [%] para cada classe de fração da duração do dia e índice de claridade calculado com base nas medições em Sines.

Através das Figuras 5.40 a 5.43, observa-se novamente que é para a faixa referida anteriormente que a média e desvio padrão das diferenças se aproxima mais de zero, sendo assim, pode-se considerar que o modelo é mais preciso para estas condições de índice de claridade e fração da duração do dia. Os valores máximos de diferença encontram-se para valores de índice de claridade baixos (inferiores a 15%) devendo-se principalmente ao facto de esta ser uma diferença relativa e de os valores de irradiação solar global medidos nestas condições serem bastante baixos.

O mesmo tipo de gráficos foi concebido, mas para diferenças entre previsão (calculada através do *downscaling* espacial por interpolação linear dupla) e medição de irradiação solar global de meia em meia hora em J/m^2 e um índice de claridade calculado com base nos dados de previsão (Figuras 5.44 a 5.47).

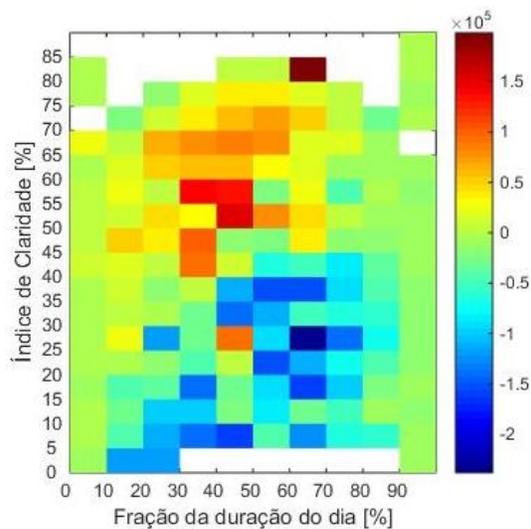


Figura 5.44 – Média das diferenças de meia em meia hora [J/m^2] para cada classe de fração da duração do dia e índice de claridade calculado com base nas previsões em Évora.

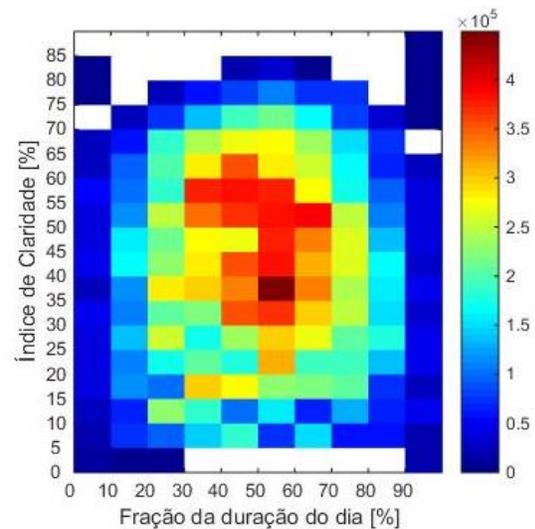


Figura 5.45 – Desvio padrão da média das diferenças de meia em meia hora [J/m^2] para cada classe de fração da duração do dia e índice de claridade calculado com base nas previsões em Évora.

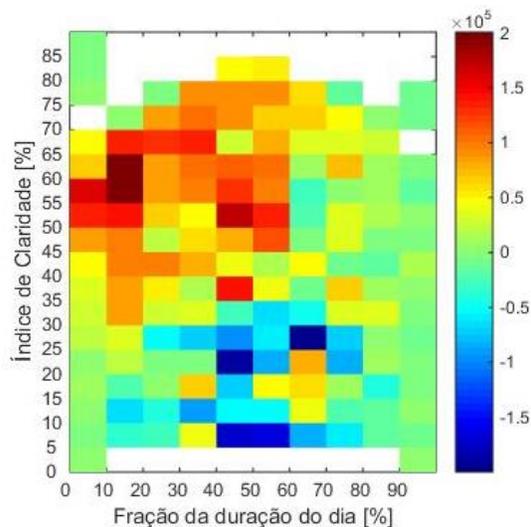


Figura 5.46 – Média das diferenças de meia em meia hora [J/m^2] para cada classe de fração da duração do dia e índice de claridade calculado com base nas previsões em Sines.

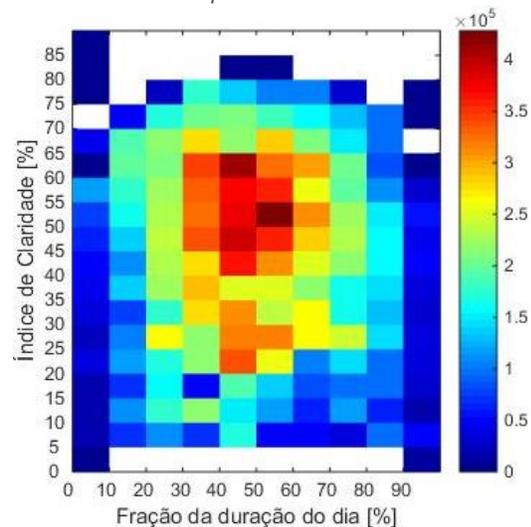


Figura 5.47 – Desvio padrão da média das diferenças de meia em meia hora [J/m^2] para cada classe de fração da duração do dia e índice de claridade calculado com base nas previsões em Sines.

Tal como na análise anterior observa-se que o modelo de previsão é mais preciso para a faixa composta por uma maior densidade de pontos já referida. O valor médio das diferenças assim como o seu desvio padrão é superior para índices de claridade intermédios (aproximadamente entre os 30% e os 65%) caracterizados pela presença de nuvens mais difíceis de prever.

5.3.4. Temperatura média do ar

Foi analisada a dependência das diferenças entre valores horários de irradiação solar global previstos e medidos com os valores horários previstos de temperatura média do ar a 2 metros após o seu *downscaling* espacial através de interpolação linear dupla.

Um estudo preliminar é apresentado no Anexo VI.1. Com o objetivo de realizar uma análise mais detalhada foram criados os gráficos das Figuras 5.48 e 5.49 que apresentam os valores médios e desvios padrão de irradiação solar global e temperatura média do ar a 2 metros para cada classe de temperatura média do ar a 2 metros.

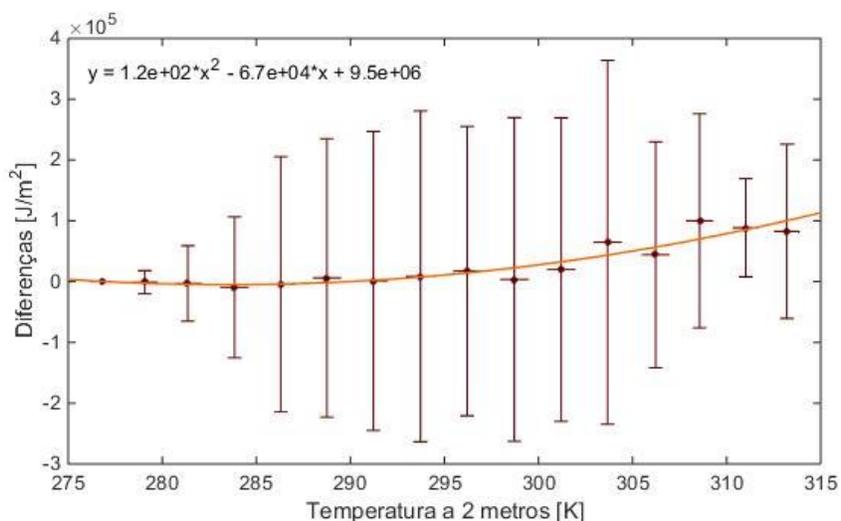


Figura 5.48 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m² e temperatura a 2m em K previstas pelo ECMWF para Évora.

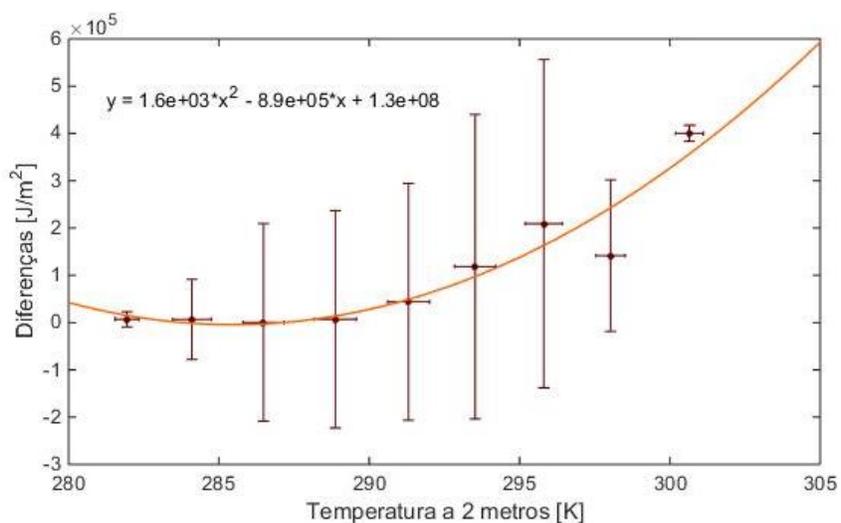


Figura 5.49 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m² e temperatura a 2m em K previstas pelo ECMWF para Sines.

Nos gráficos das figuras anteriores pode-se verificar que a previsão tende a sobrestimar os valores de irradiação solar global para valores de temperatura média do ar a 2 metros superiores (aproximadamente acima de 300K para Évora e 290K para Sines) e também que existe uma tendência para uma menor dispersão das diferenças para valores de temperatura média do ar inferiores, mas que pode apenas dever-se a um menor número de observações para estas condições.

Há que ter em conta, no entanto, que a temperatura média do ar se pode relacionar com o índice de claridade, por exemplo. Há uma maior probabilidade de existirem valores de temperatura média do ar mais elevados em períodos com um índice de claridade superior. Assim, caso os dados

de previsão sejam corrigidos inicialmente através da sua dependência com o índice de claridade, os dados de irradiação solar global resultantes podem já não mostrar esta tendência com diferenças entre previsão e medição superiores para valores de temperatura média do ar também superiores.

As Figuras 5.50 e 5.51 apresentam as diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em função da temperatura média do ar a 2 metros e do índice de claridade calculado com os dados de previsão de irradiação solar global para Évora e Sines, respetivamente.

Como se verificou na Secção 5.3.1, quando o índice de claridade é calculado com dados de previsão, o modelo tende a sobrestimar os valores de irradiação solar global para valores de índice de claridade superiores. Nas figuras seguintes verifica-se que pontos com valores de temperatura média do ar superiores existem para valores de índice de claridade acima de 60% e que as diferenças negativas estão concentradas na zona de índice de claridade inferior a estes mesmos 60%.

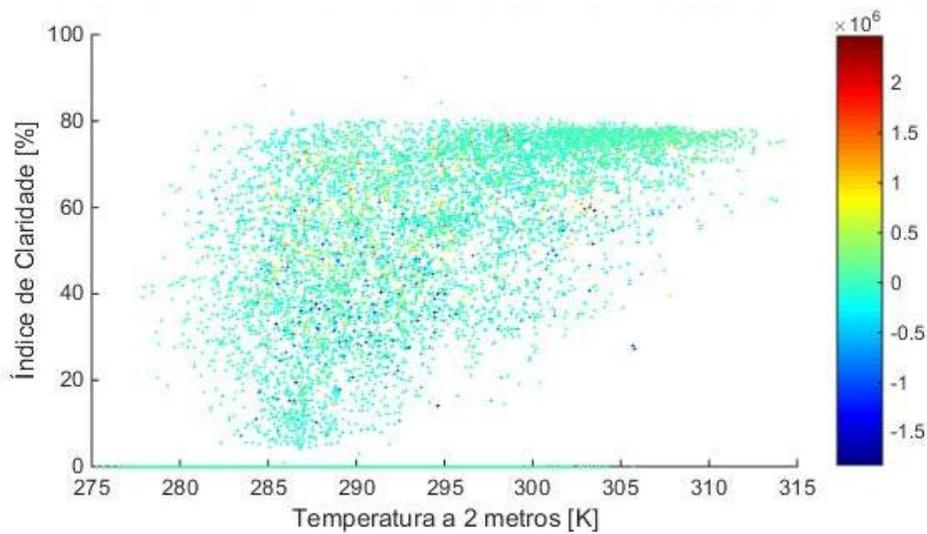


Figura 5.50 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da temperatura a 2 metros e do índice de claridade calculado com os dados de previsão para Évora.

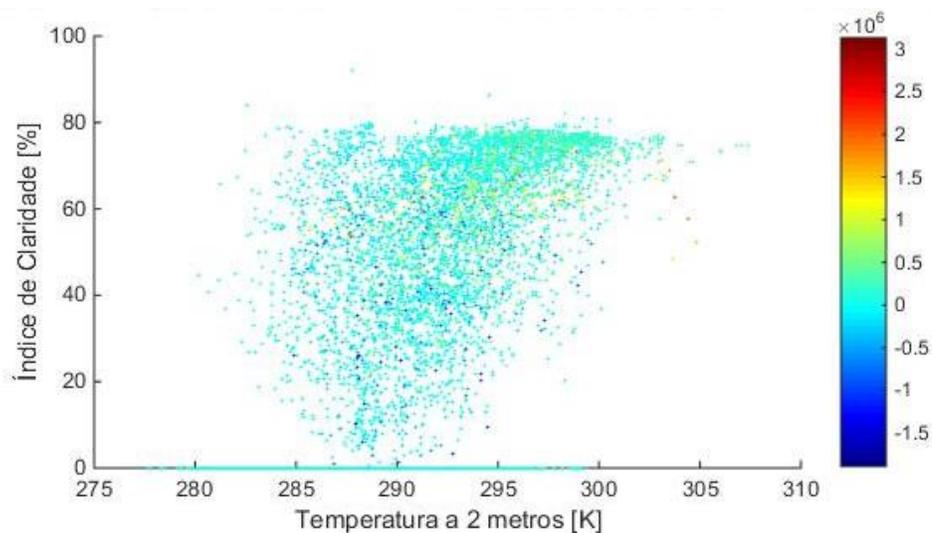


Figura 5.51 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da temperatura a 2 metros e do índice de claridade calculado com os dados de previsão para Sines.

5.3.5. Humidade relativa do ar

Outra propriedade atmosférica que exhibe uma correlação com a diferença entre previsão e medição da irradiação solar global é a humidade relativa. A previsão desta variável é obtida através da aplicação das equações (3.2) e (3.3) aos valores previstos de temperatura média do ar a 2 metros e de temperatura de ponto de orvalho fornecidos pelo ECMWF e do posterior *downscaling* espacial através de interpolação linear dupla para os locais de medição em Évora e Sines.

Com estes dados foi realizada uma análise preliminar apresentada no Anexo VI.2 e construídos gráficos com a média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsões e medições de irradiação solar global e dos valores de humidade relativa por cada classe de humidade relativa de modo a fazer uma análise mais aprofundada.

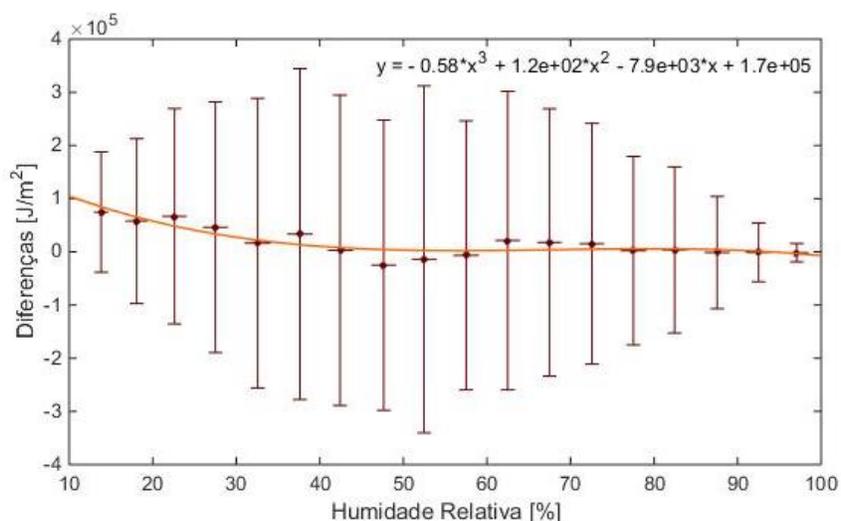


Figura 5.52 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e humidade relativa em % calculada com as previsões do ECMWF para Évora.

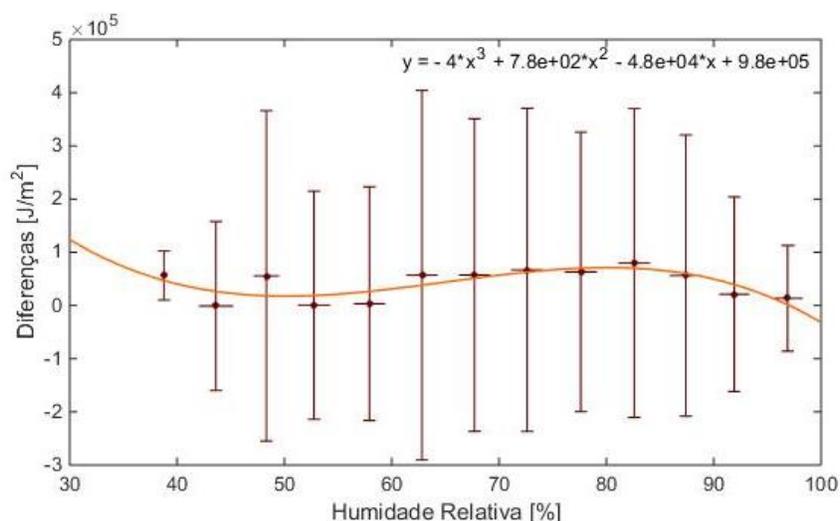


Figura 5.53 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e humidade relativa em % calculada com as previsões do ECMWF para Sines.

Nas Figuras 5.52 e 5.53 verificam-se valores médios de diferença entre previsões e medições com menor variação (no caso de Sines e Évora) e próximos de zero (no caso de Évora) para valores de

humidade relativa superiores a 70% existindo valores de diferença médios superiores para valores de humidade relativa abaixo dos 40%, especialmente no caso de Évora. Verifica-se ainda menor dispersão das diferenças para valores mínimos e máximos de humidade relativa que possivelmente se devem ao facto de existirem menos observações para estas condições.

Tal como com a temperatura média do ar, há que considerar que a humidade relativa se pode relacionar com o índice de claridade, por exemplo. Há uma maior probabilidade de existirem valores de humidade relativa inferiores para períodos com um índice de claridade superior. Assim, caso os dados de previsão sejam corrigidos inicialmente através da sua dependência do índice de claridade, os dados de irradiação solar global resultantes podem já não mostrar esta tendência que apresenta diferenças entre previsão e medição superiores para valores de humidade relativa inferiores.

As Figuras 5.54 e 5.55 apresentam as diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em função da humidade relativa e do índice de claridade calculado com os dados de previsão de irradiação solar global para Évora e Sines, respetivamente.

Como se verificou na Secção 5.3.1, quando o índice de claridade é calculado com dados de previsão o modelo tende a sobrestimar os valores de irradiação solar global para valores de índice de claridade superiores. Nas Figuras 5.54 e 5.55 verifica-se que pontos com valores de humidade relativa inferiores se concentram para valores de índice de claridade acima de 60% e que as diferenças negativas estão concentradas na zona de índice de claridade inferior a estes mesmos 60%. Isto resulta numa tendência para um valor de diferença superior para valores de humidade relativa inferiores. Esta tendência não é visível para Sines provavelmente por não existirem previsões de valores de humidade relativa inferiores a 30%.

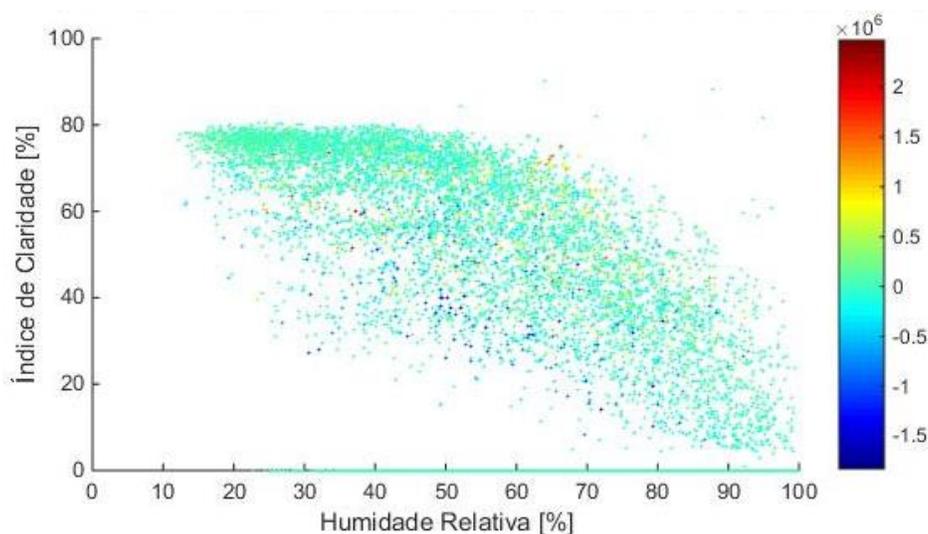


Figura 5.54 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da humidade relativa e do índice de claridade calculado com os dados de previsão para Évora.

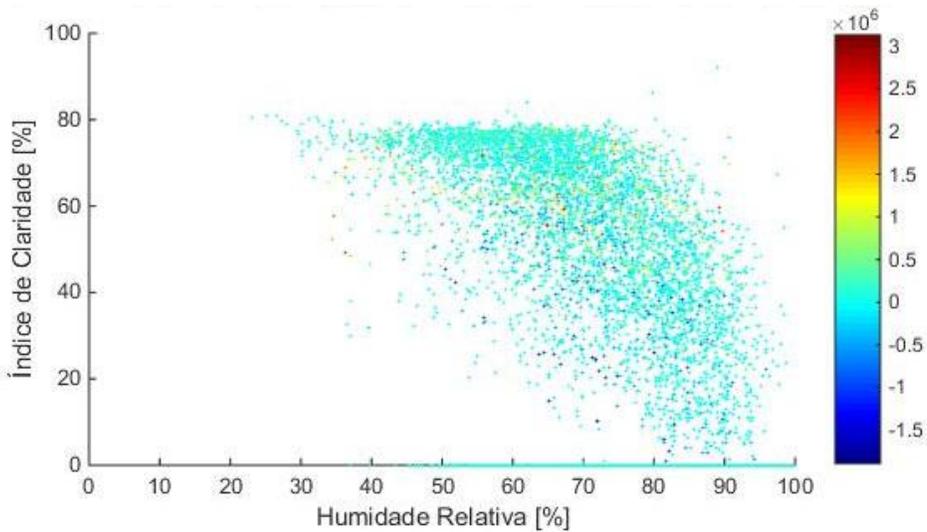


Figura 5.55 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da humidade relativa e do índice de claridade calculado com os dados de previsão para Sines.

5.3.6. Coluna de água

A coluna ou conteúdo de água é uma variável meteorológica prevista pelo ECMWF e representa a quantidade de água, em qualquer estado, numa coluna vertical da atmosfera. Após o *downscaling* espacial através da interpolação linear dupla desta variável para o local de medições, foi realizada uma análise prévia apresentada no Anexo VI.6. Foram também construídos gráficos com as médias e desvios padrão dos valores de diferença horária entre previsão e medição de irradiação solar global e de coluna de água para cada classe de valores previstos de coluna de água.

Nas Figuras 5.56 e 5.57 verifica-se que os valores médios e desvios padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global tendem a aumentar com o aumento do conteúdo de água na atmosfera com a exceção de valores de coluna de água entre 40 e 45 kg/m^3 para os quais não existe uma quantidade de pontos significativa.

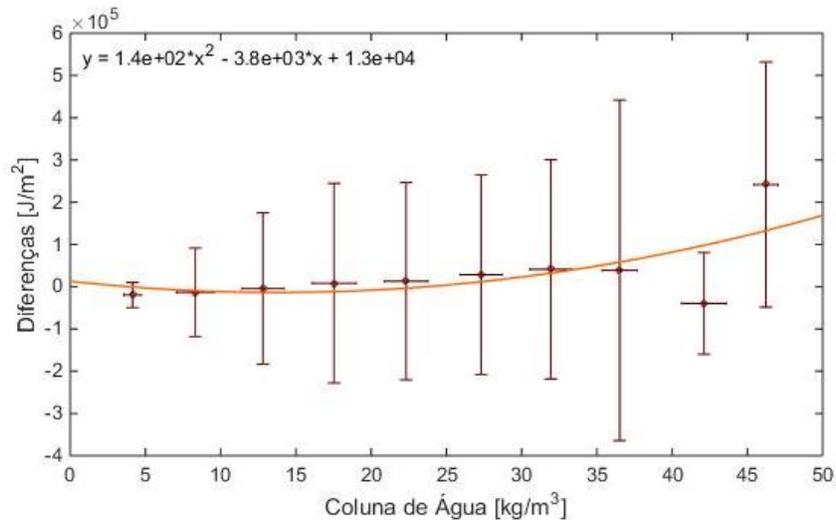


Figura 5.56 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e coluna de água prevista para Évora.

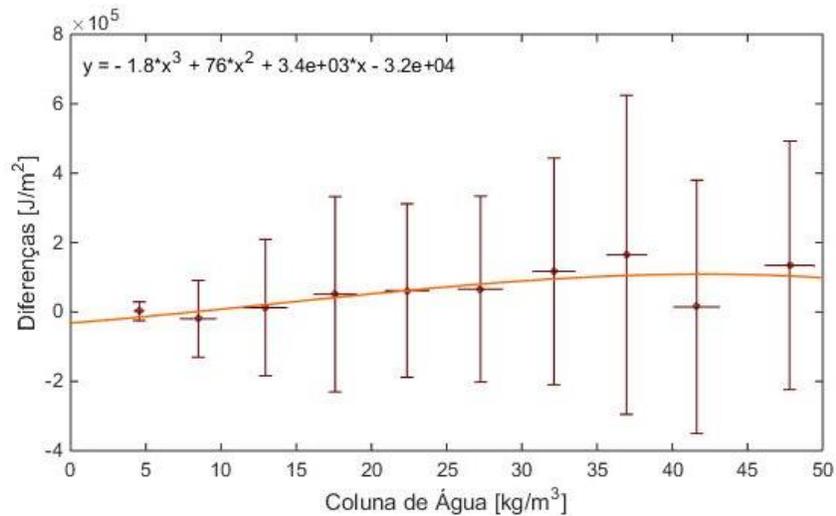


Figura 5.57 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e coluna de água prevista para Sines.

Tal como com as outras propriedades que mostram uma relação com o valor de diferença, há que ter em consideração que a coluna de água se pode relacionar com o índice de claridade ou outra variável que poderá ser utilizada para corrigir as previsões. No entanto, ao observar as Figuras 5.58 e 5.59 verifica-se que a coluna de água prevista não mostra uma tendência clara em função do índice de claridade e que, simplesmente, as diferenças negativas se concentram abaixo de valores de coluna de água de 30 kg/m^3 dando origem a uma tendência de valores de diferenças superiores e positivos para valores de coluna de água elevados que não se mostram estar relacionados com o índice de claridade.

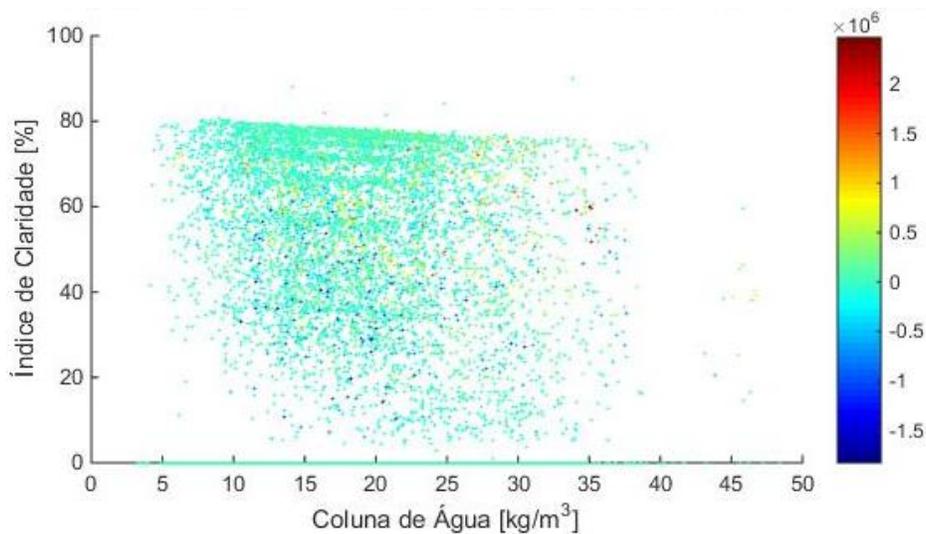


Figura 5.58 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da coluna de água e do índice de claridade calculado com os dados de previsão para Évora.

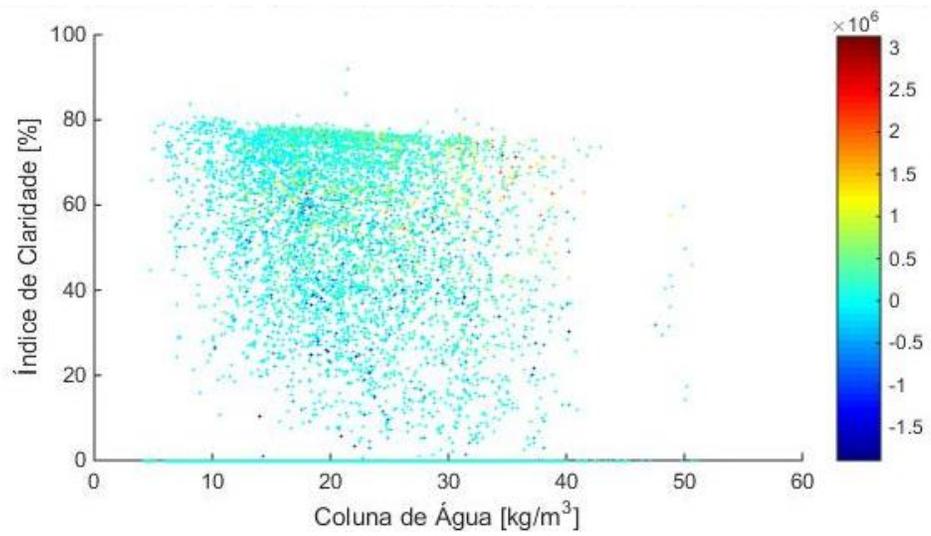


Figura 5.59 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da coluna de água e do índice de claridade calculado com os dados de previsão para Sines.

6. Análise de modelos simples de céu limpo

Neste capítulo serão analisados e comparados, entre si e também com a previsão realizada pelo ECMWF, modelos simples de radiação solar em condições de céu limpo descritos na Secção 2.2 com base nas previsões e medições obtidas para o período de três dias de céu limpo de 1 a 3 de maio de 2016 em Évora e Sines.

Estes modelos são caracterizados por permitirem prever a radiação solar global em condições de céu limpo tendo como *inputs* apenas variáveis possíveis de obter ou determinar *offline* e sem recurso a medições e por serem ainda utilizados em diversas aplicações atualmente.

6.1. Modelo de Fu e Rich

O modelo de Fu e Rich [66] foi apresentado na Secção 2.2.1, sendo agora analisado. Em forma de exemplo, foram construídos gráficos das Figuras 6.1 a 6.4, os quais permitem a comparação da irradiação solar global calculada pelo modelo de Fu e Rich, pelo ECMWF (interpolação linear dupla) e medida para 72 horas seguidas de céu limpo em Évora e Sines. O cálculo da irradiação solar global no plano horizontal pelo modelo de Fu e Rich foi realizado através da Equação (2.17) para cada minuto. Estes dados foram depois transformados em valores horários e de meia em meia hora de irradiação solar global.

Verifica-se uma boa aproximação entre os valores de irradiação solar global determinados com os dados do ECMWF e as medições para os casos estudados. Os dados calculados através do modelo de Fu e Rich mostram uma subestimação do valor de irradiação quer para Évora quer para Sines ao longo do dia, mais perceptível nos gráficos das Figuras 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8 que apresentam as diferenças em kJ/m^2 entre a previsão obtida através dos dados fornecidos pelo ECMWF e as medições e a previsão obtida pelo modelo de Fu e Rich e as medições para Évora e Sines.

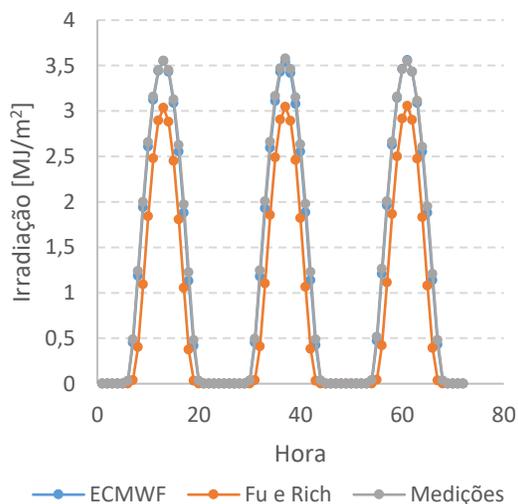


Figura 6.1 – Irradiação solar global horária para Évora.

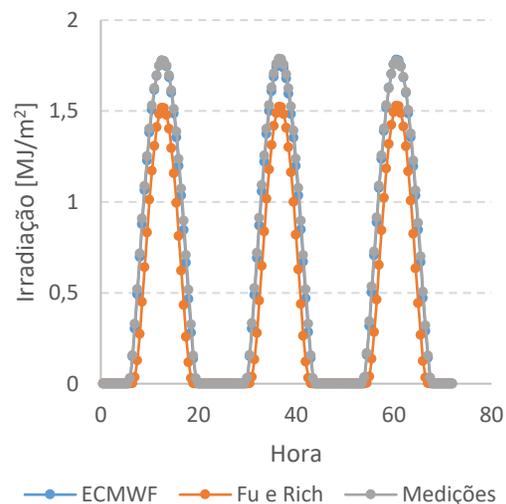


Figura 6.2 – Irradiação solar global de meia em meia hora para Évora.

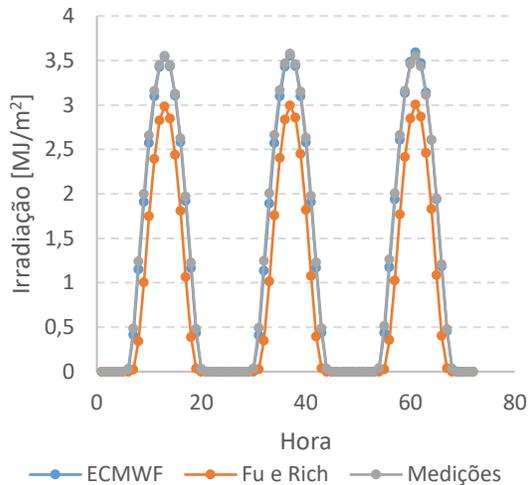


Figura 6.3 – Irradiação solar global horária para Sines.

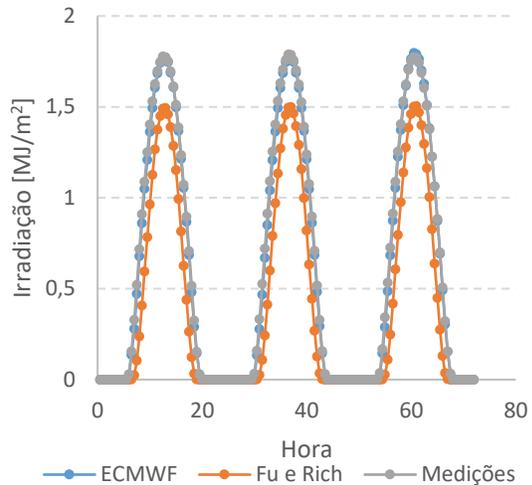


Figura 6.4 – Irradiação solar global de meia em meia hora para Sines.

Através dos gráficos das Figuras 6.5 a 6.8, verifica-se a existência de uma diferença horária absoluta máxima entre previsões obtidas através do modelo de Fu e Rich e medições de cerca de $0,9 \text{ MJ/m}^2$ para Évora e 1 MJ/m^2 para Sines e uma diferença de meia em meia hora absoluta máxima de cerca de $0,46 \text{ MJ/m}^2$ para Évora e $0,5 \text{ MJ/m}^2$ para Sines, para os dias considerados, sendo frequente a existência de uma maior diferença entre previsão e medição para Sines do que para Évora. Este modelo tem uma precisão inferior à do modelo do ECMWF, como seria de esperar, sendo que o ECMWF apresenta diferenças máximas absolutas horárias de cerca de 90 kJ/m^2 para Évora e 116 kJ/m^2 para Sines e de diferenças máximas absolutas de meia em meia hora de cerca de 50 kJ/m^2 para Évora e 62 kJ/m^2 para Sines.

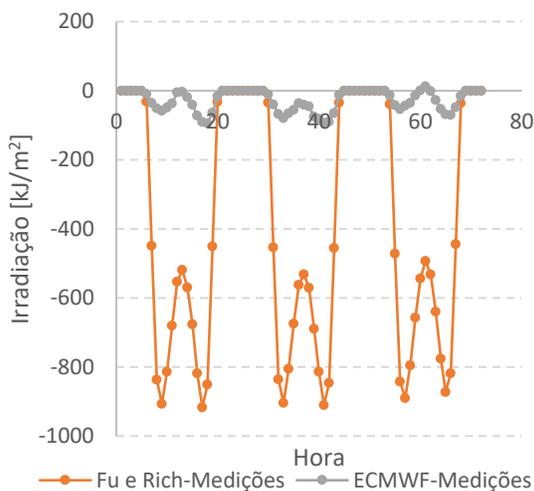


Figura 6.5 – Diferenças horárias de irradiação solar global em kJ/m^2 para Évora.

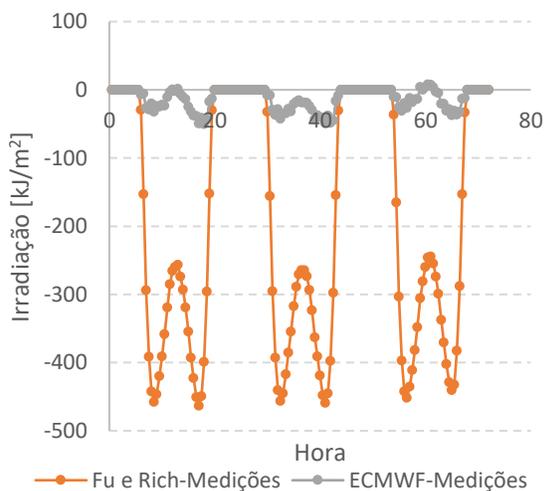


Figura 6.6 – Diferenças de meia em meia hora de irradiação solar global em kJ/m^2 para Évora.

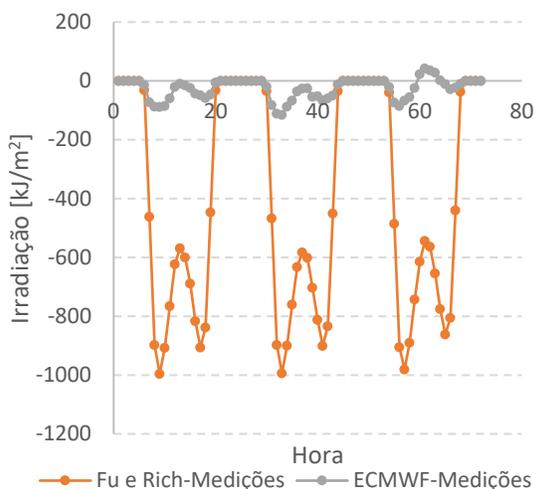


Figura 6.7 – Diferenças horárias de irradiação solar global em kJ/m² para Sines.

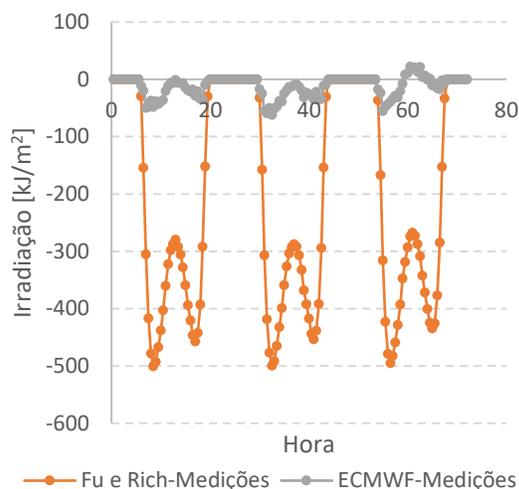


Figura 6.8 – Diferenças de meia em meia hora de irradiação solar global em kJ/m² para Sines.

6.2. Modelo HLJ

O modelo HLJ (Hottel, Liu e Jordan [67,68]) já apresentado na Secção 2.2.2 é agora analisado. Tal como para o modelo da secção anterior, foram construídos gráficos que permitem a comparação da irradiação solar global calculada pelo modelo HLJ, pelo ECMWF e medida para 72 horas seguidas de céu limpo em Évora e Sines. O cálculo da irradiância solar global no plano horizontal pelo modelo HLJ foi realizado através da Equação (2.25) para cada minuto, sendo os fatores de correção utilizados os correspondentes à categoria de latitude média, verão. Estes dados foram depois transformados em valores horários e de meia em meia hora de irradiação solar global.

As Figuras 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12 apresentam os dados de irradiação solar global obtidos através da interpolação linear dupla dos dados provenientes do ECMWF, do modelo HLJ e das medições horárias e de meia em meia hora em Évora e Sines.

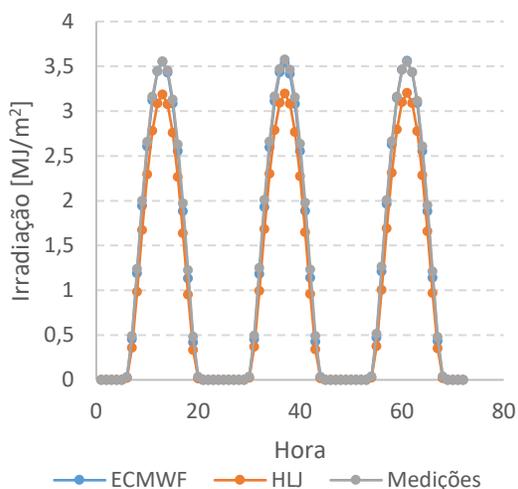


Figura 6.9 – Irradiação solar global horária para Évora.

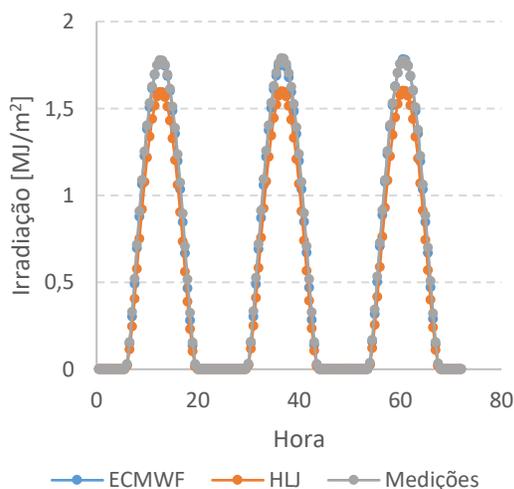


Figura 6.10 – Irradiação solar global de meia em meia hora para Évora.

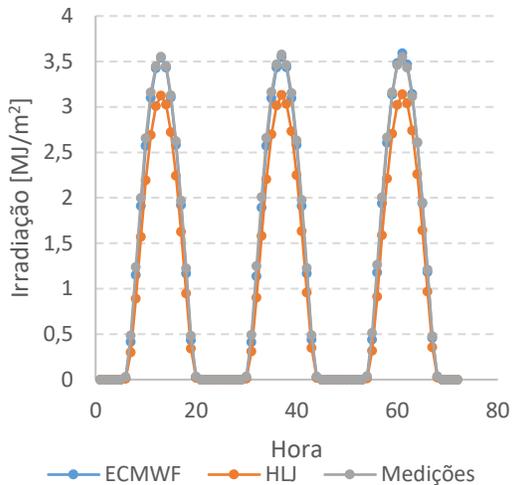


Figura 6.11 – Irradiação solar global horária para Sines.

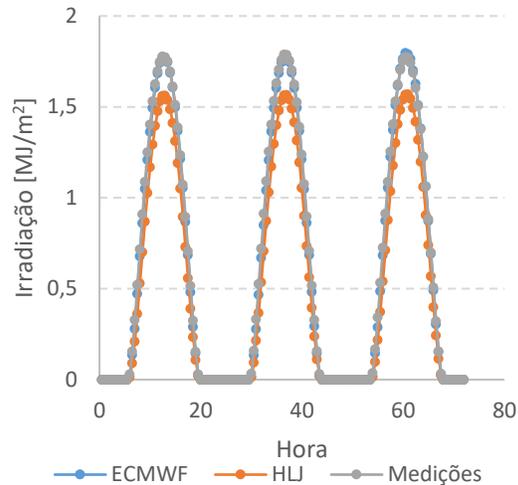


Figura 6.12 – Irradiação solar global de meia em meia hora para Sines.

Os dados de irradiação solar global calculados através do modelo HLJ mostram uma subestimação do valor de irradiação quer para Évora quer para Sines ao longo do dia, mais perceptível nos gráficos das Figuras 6.13, 6.14, 6.15 e 6.16 que apresentam as diferenças em kJ/m^2 entre a previsão obtida através dos dados fornecidos pelo ECMWF e as medições e a previsão obtida pelo modelo HLJ e as medições.

Este modelo apresenta diferenças absolutas máximas horárias entre previsão e medição de cerca de $0,38 \text{ MJ/m}^2$ para Évora e $0,47 \text{ MJ/m}^2$ para Sines e diferenças absolutas máximas de meia em meia hora de cerca de $0,19 \text{ MJ/m}^2$ para Évora e $0,24 \text{ MJ/m}^2$ para Sines, sendo frequente a existência de uma maior diferença entre previsão e medição para Sines do que para Évora. Este modelo também apresenta uma precisão inferior à do modelo do ECMWF, como seria de esperar, sendo que o ECMWF apresenta diferenças máximas absolutas horárias de cerca de 90 kJ/m^2 para Évora e 116 kJ/m^2 para Sines e de diferenças máximas absolutas de meia em meia hora de cerca de 50 kJ/m^2 para Évora e 62 kJ/m^2 para Sines.

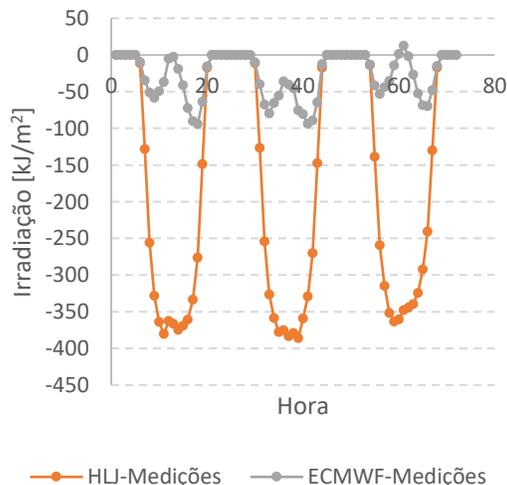


Figura 6.13 – Diferenças horárias de irradiação solar global em kJ/m^2 para Évora.

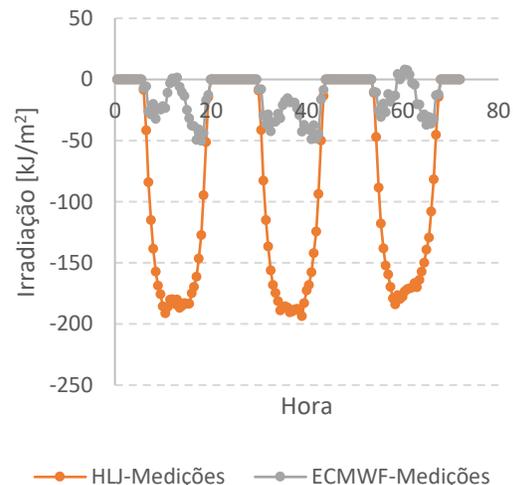


Figura 6.14 – Diferenças de meia em meia hora de irradiação solar global em kJ/m^2 para Évora.

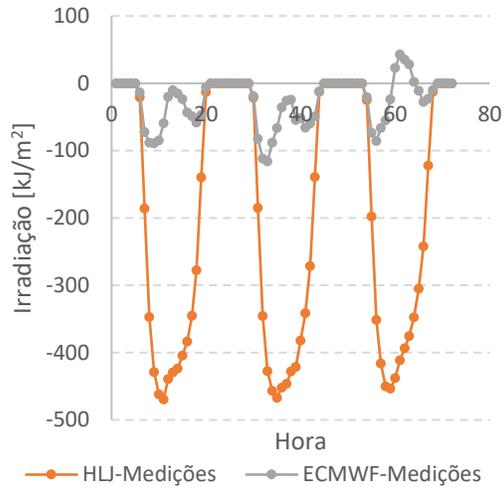


Figura 6.15 – Diferenças horárias de irradiação solar global em kJ/m² para Sines.

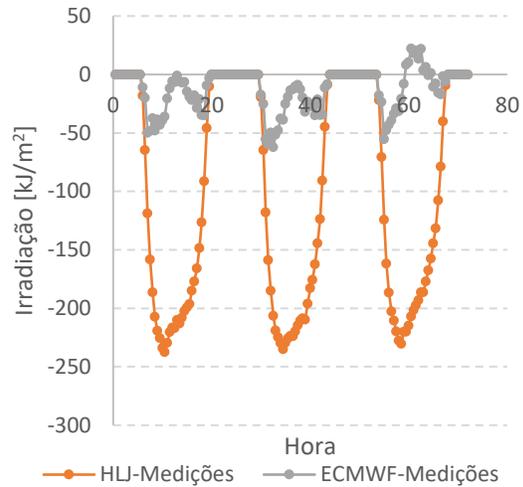


Figura 6.16 – Diferenças de meia em meia hora de irradiação solar global em kJ/m² para Sines.

6.3. Modelo ASHRAE

Tal como os modelos anteriores, o modelo ASHRAE foi apresentado previamente (Secção 2.2.3) e analisado através de gráficos onde a irradiação solar global calculada por este modelo, pelo ECMWF e medida para 72 horas seguidas de céu limpo em Évora e Sines é comparada. O cálculo da irradiância solar global no plano horizontal pelo modelo ASHRAE foi realizado através da Equação (2.28) para cada minuto e utilizando o valor interpolado para o dia em questão dos coeficientes A_m , B_m e C_m apresentados na Tabela 2.2. Estes dados foram depois transformados em valores horários e de meia em meia hora de irradiação solar global.

As Figuras 6.17, 6.18, 6.19 e 6.20 mostram os dados de irradiação solar global obtidos através da interpolação linear dupla dos dados provenientes do ECMWF, do modelo ASHRAE e das medições horárias e de meia em meia hora para Évora e Sines, apresentando uma ligeira subestimação da radiação solar global por parte do modelo ASHRAE.

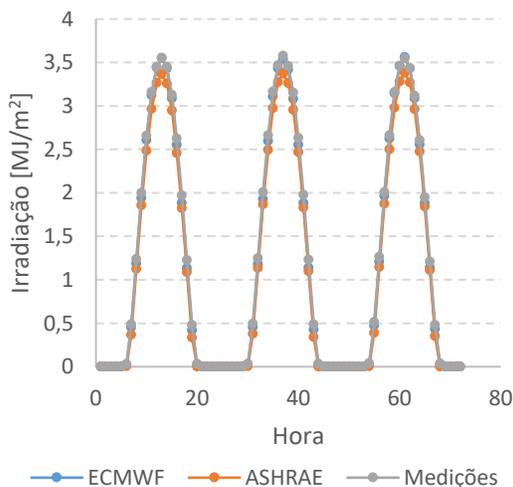


Figura 6.17 – Irradiação solar global horária para Évora.

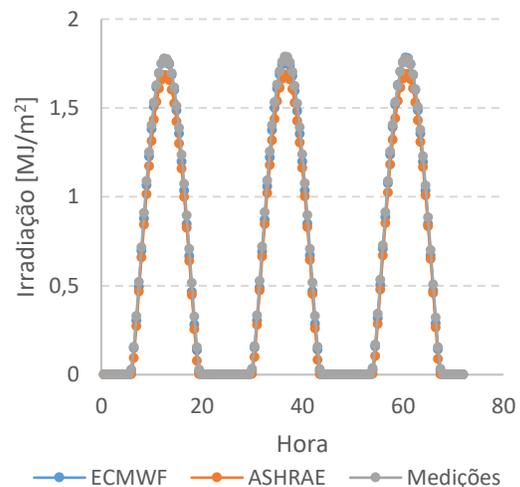


Figura 6.18 – Irradiação solar global de meia em meia hora para Évora.

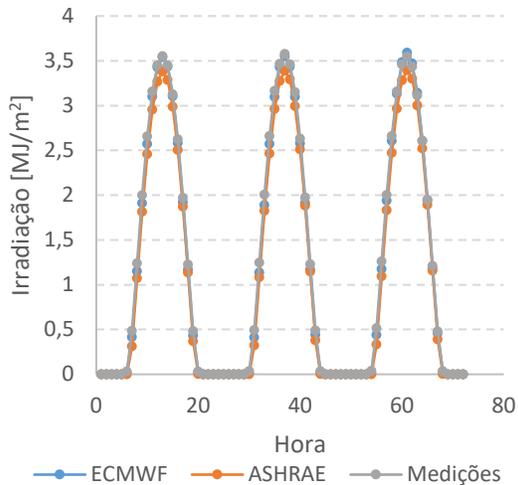


Figura 6.19 – Irradiação solar global horária para Sines.

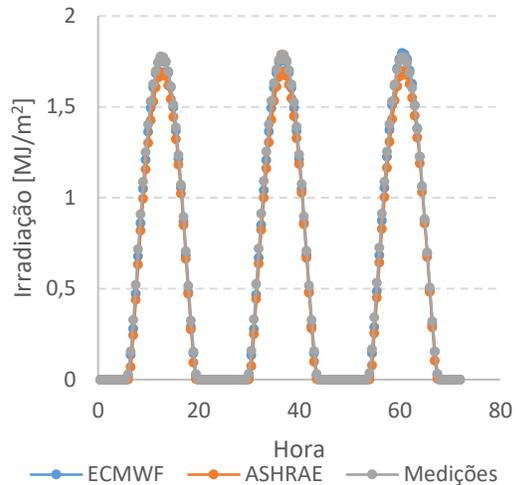


Figura 6.20 – Irradiação solar global de meia em meia hora para Sines.

As Figuras 6.21, 6.22, 6.23 e 6.24 apresentam as diferenças em kJ/m^2 entre a irradiação solar global horária e de meia em meia hora calculada com os dados do ECMWF através de interpolação linear dupla e as medições e a calculada através do modelo ASHRAE e as medições para Évora e Sines. Estas mostram uma subestimação dos valores de irradiação solar global por parte do modelo ASHRAE com diferenças absolutas máximas horárias entre previsão e medição de cerca de 205 kJ/m^2 , quer para Évora quer para Sines, e diferenças absolutas máximas de meia em meia hora de cerca de 99 kJ/m^2 para Évora e 104 kJ/m^2 para Sines, para os dias considerados. Embora mais preciso que os modelos analisados anteriormente, este modelo também apresenta uma precisão inferior à do modelo do ECMWF, como seria de esperar, sendo que o ECMWF apresenta diferenças máximas absolutas horárias de cerca de 90 kJ/m^2 para Évora e 116 kJ/m^2 para Sines e de diferenças máximas absolutas de meia em meia hora de cerca de 50 kJ/m^2 para Évora e 62 kJ/m^2 para Sines.

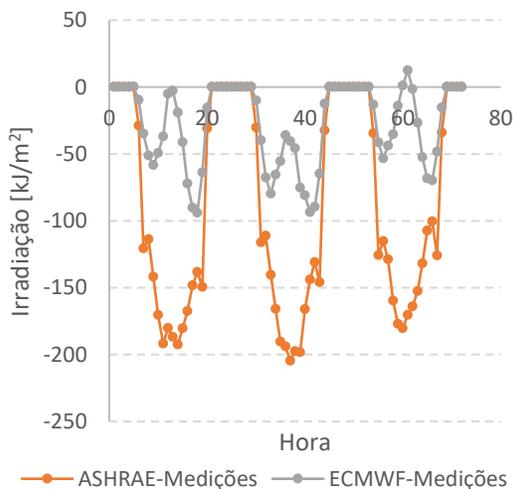


Figura 6.21 – Diferenças horárias de irradiação solar global em kJ/m^2 para Évora.

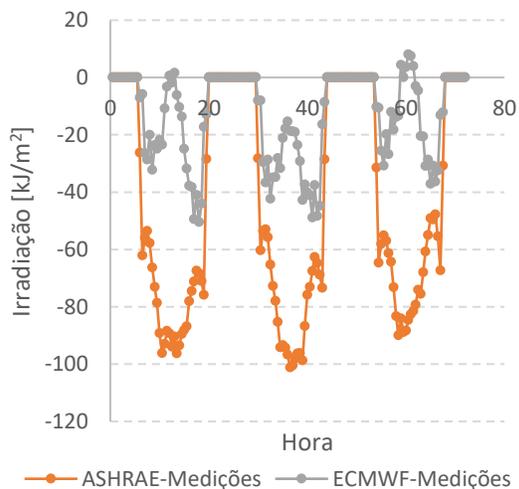


Figura 6.22 – Diferenças de meia em meia hora de irradiação solar global em kJ/m^2 para Évora.

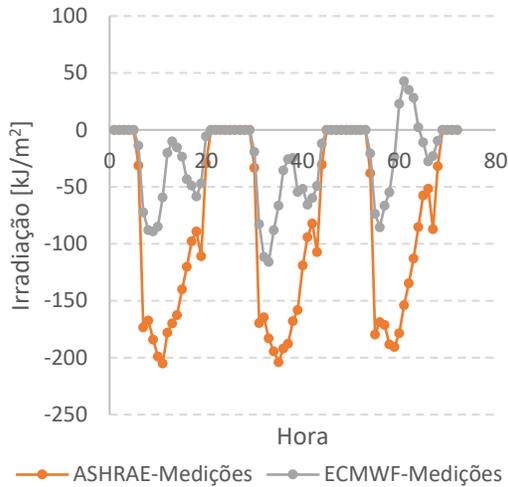


Figura 6.23 – Diferenças horárias de irradiação solar global em kJ/m^2 para Sines.

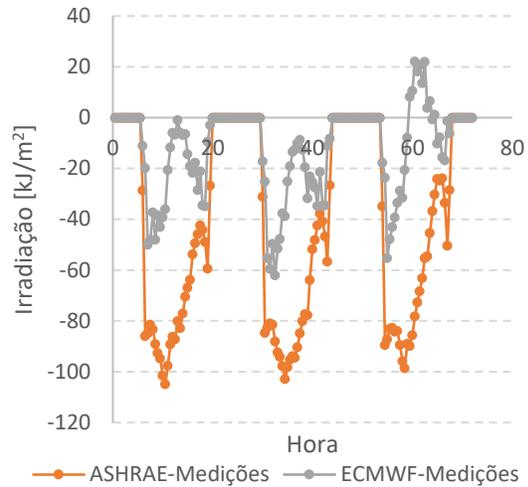


Figura 6.24 – Diferenças de meia em meia hora de irradiação solar global em kJ/m^2 para Sines.

6.4. Modelo SMARTS

O modelo SMARTS é um código de cálculo da transferência radiativa na atmosfera como descrito na Secção 2.2.4. O ficheiro de *input* utilizado foi o descrito na mesma secção, sendo os dados de irradiância solar global determinados para os mesmos dias que os restantes modelos para os pontos médios de cada meia hora, tendo em atenção as meias horas do nascer e pôr do Sol para os posteriores cálculos de irradiação solar global de meia em meia hora. Estes valores foram obtidos para Évora e Sines como mostram as Figuras 6.25 e 6.26.

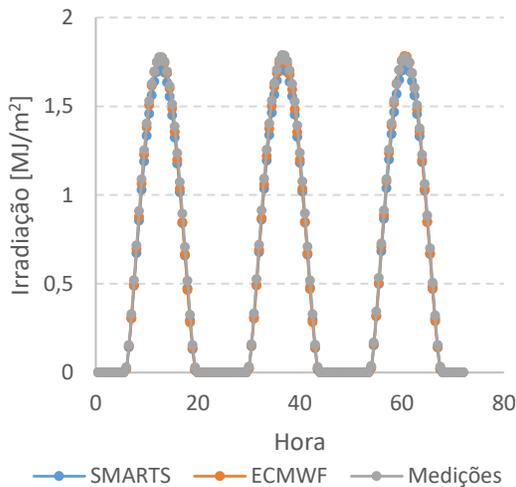


Figura 6.25 – Irradiação solar global de meia em meia hora para Évora.

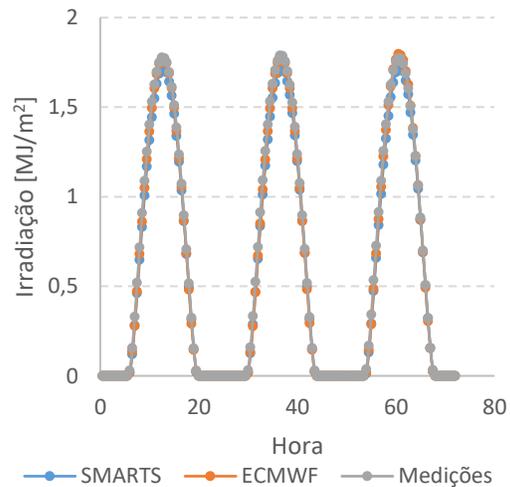


Figura 6.26 – Irradiação solar global de meia em meia hora para Sines.

As figuras anteriores apresentam uma elevada concordância entre os valores de irradiação solar global determinados pelo modelo SMARTS com os dados obtidos do ECMWF e as medições quer para Évora quer para Sines. As Figuras 6.27 e 6.28 mostram o mesmo com mais clareza ao apresentarem as diferenças entre os valores de irradiação obtidos pelo modelo SMARTS e as

medições assim como as diferenças entre os valores de irradiação calculados com os dados do ECMWF e as medições.

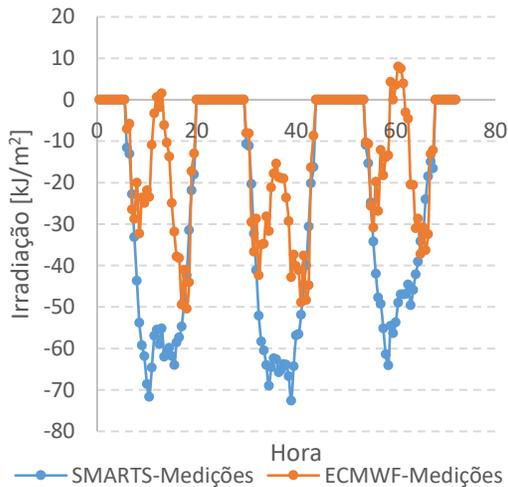


Figura 6.27 – Diferenças horárias de irradiação solar global em kJ/m² para Évora.

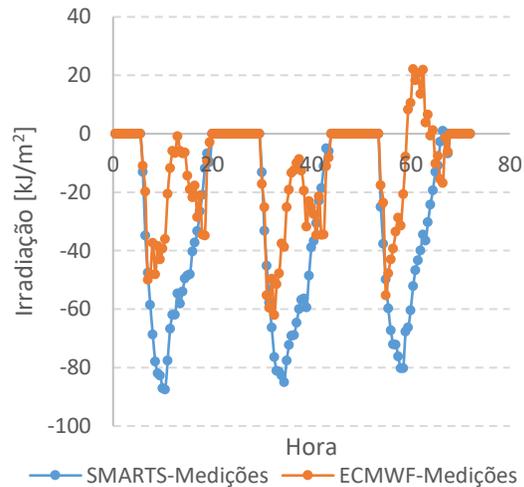


Figura 6.28 – Diferenças horárias de irradiação solar global em kJ/m² para Sines.

Verifica-se, ao analisar as figuras anteriores, que este modelo fornece valores de irradiação solar global mais precisos do que os modelos analisados anteriormente, resultando numa diferença absoluta máxima de cerca de 72 kJ/m² para Évora e 87 kJ/m² para Sines que, sendo estas diferenças negativas, demonstram uma subestimação da irradiação solar global por parte do modelo SMARTS. Este modelo apresenta diferenças com valores bastante próximos aos das diferenças entre previsão do modelo do ECMWF e medições com diferenças máximas absolutas horárias de cerca de 90kJ/m² para Évora e 116kJ/m² para Sines e de diferenças máximas absolutas de meia em meia hora de cerca de 50kJ/m² para Évora e 62kJ/m² para Sines.

6.5. Comparação entre modelos

Para uma comparação entre os vários modelos analisados mais compreensível, foram construídos os gráficos das Figuras 6.29 e 6.30 que apresentam as diferenças de meia em meia hora, em kJ/m², entre a previsão de cada um dos modelos analisados na Secção 6 e do modelo do ECMWF e as medições correspondentes ao período referido anteriormente (de 1 a 3 de maio de 2016) para Évora e Sines, respetivamente.

Observando as Figuras 6.29 e 6.30 pode-se concluir que para o período analisado o modelo com pior desempenho é o de Fu e Rich seguido do modelo HLJ, quer para Évora quer para Sines. Como seria de esperar, o modelo do ECMWF mostra ser o modelo com maior precisão sendo o modelo de transferência radiativa SMARTS o modelo de radiação solar em condições de céu limpo que mais se aproxima dos valores medidos seguido do modelo simples de radiação solar em condições de céu limpo ASHRAE.

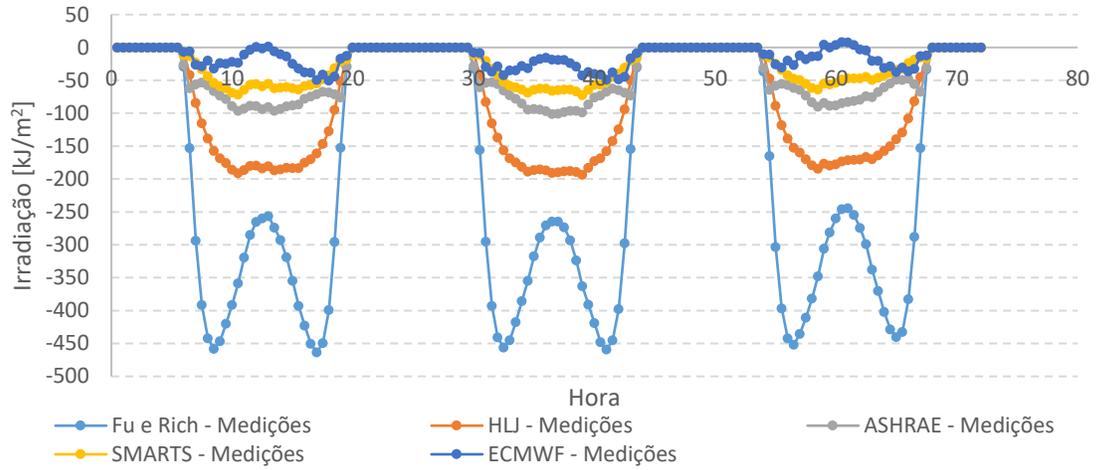


Figura 6.29 – Diferenças entre as previsões dos vários modelos apresentados e as medições de meia em meia hora em kJ/m^2 para Évora.

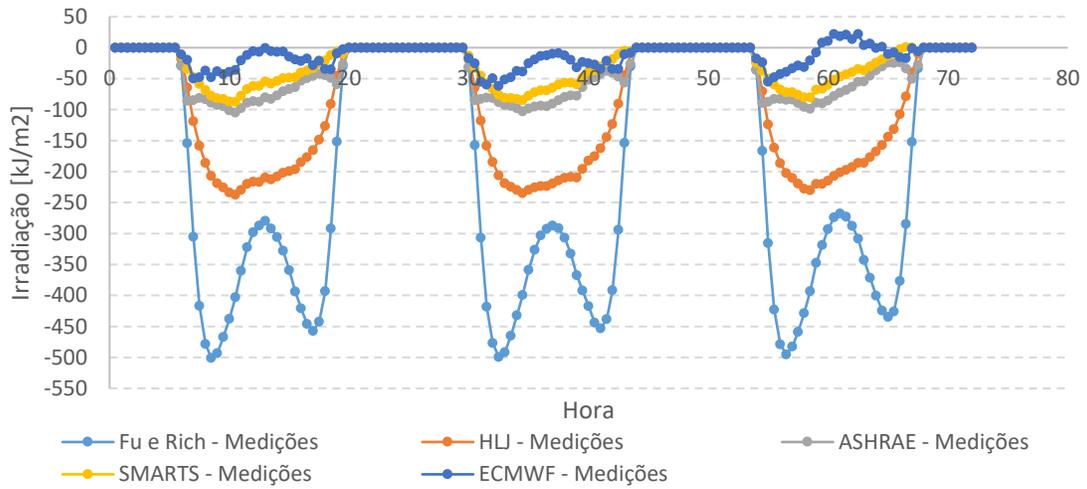


Figura 6.30 – Diferenças entre as previsões dos vários modelos apresentados e as medições de meia em meia hora em kJ/m^2 para Sines.

7. Desenvolvimento de um algoritmo de previsão

Neste capítulo é feita uma descrição do algoritmo de previsão de radiação solar assim como o formato dos seus *inputs* e *outputs*.

7.1. Valores de entrada do algoritmo

Como valores de entrada, o algoritmo necessitará dos dados provenientes do ECMWF como referido anteriormente. Estes dados serão de radiação solar descendente horária, em J/m^2 , acumulada ao longo da previsão e temperatura média horária do ar a 2 metros, em K, sendo que outras variáveis complementares, como as presentes na Tabela 3.1, poderão ser necessárias. Em particular as variáveis necessárias para o cálculo da humidade relativa (temperatura do ponto de orvalho para além da temperatura do ar a 2 metros) e a coluna de água poderão ser utilizadas pois, como se verificou na Secção 5.3, têm impacto no valor das diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global. Estes dados estarão no formato NetCDF e corresponderão às previsões para 72 horas iniciadas às 00UTC de cada dia, posteriormente substituídas pelas iniciadas às 12UTC caso o utilizador assim o exija.

Outros dados de entrada necessários serão a localização da instalação, nomeadamente a sua latitude, longitude e altitude, nome do local e país. Estes dados deverão ser introduzidos pelo utilizador.

7.2. Características do algoritmo

O fluxograma apresentado na Figura 7.1 mostra o esquema básico do funcionamento do algoritmo a desenvolver.

Os dados de entrada descritos na secção anterior são recolhidos e analisados quanto a falhas quer na recolha quer nos próprios dados. Caso não haja problemas com os dados recolhidos é realizado um tratamento destes em que são selecionados os pontos da grelha de previsão mais próximos ao local de interesse ou o local de instalação de um sistema de energia solar, obtido o verdadeiro valor das variáveis recolhidas através do fator de escala e *offset* de cada variável sendo ainda as variáveis acumuladas tratadas para obtenção dos seus valores horários.

De seguida é realizado o *downscaling* espacial da irradiação solar global e temperatura média do ar para o local da instalação e serão aplicadas correções, a desenvolver futuramente, de acordo com a dependência destas variáveis com as outras variáveis atmosféricas obtidas também através do ECMWF, como referido na Secção 7.1, sendo depois aplicado o *downscaling* temporal para a obtenção de dados de meia em meia hora.

O algoritmo realizará ainda uma estimativa do erro associado aos valores de cada variável (irradiação solar global e temperatura média do ar) de modo a que o utilizador ou outro modelo de cálculo tenha acesso a essa informação assim como uma estimativa do valor de irradiação solar global diário e respetivo erro associado.

Os dados resultantes são analisados quanto à sua fiabilidade sendo que no caso da existência de valores que excedam os limites impostos (descritos na Secção 7.3) ou no caso de ter existido falhas na recolha dos dados, os dados provenientes do ECMWF são descartados sendo utilizado um

modelo de radiação solar para condições de céu limpo para o cálculo dos valores de meia em meia hora e diários de irradiação solar global e temperatura média do ar.

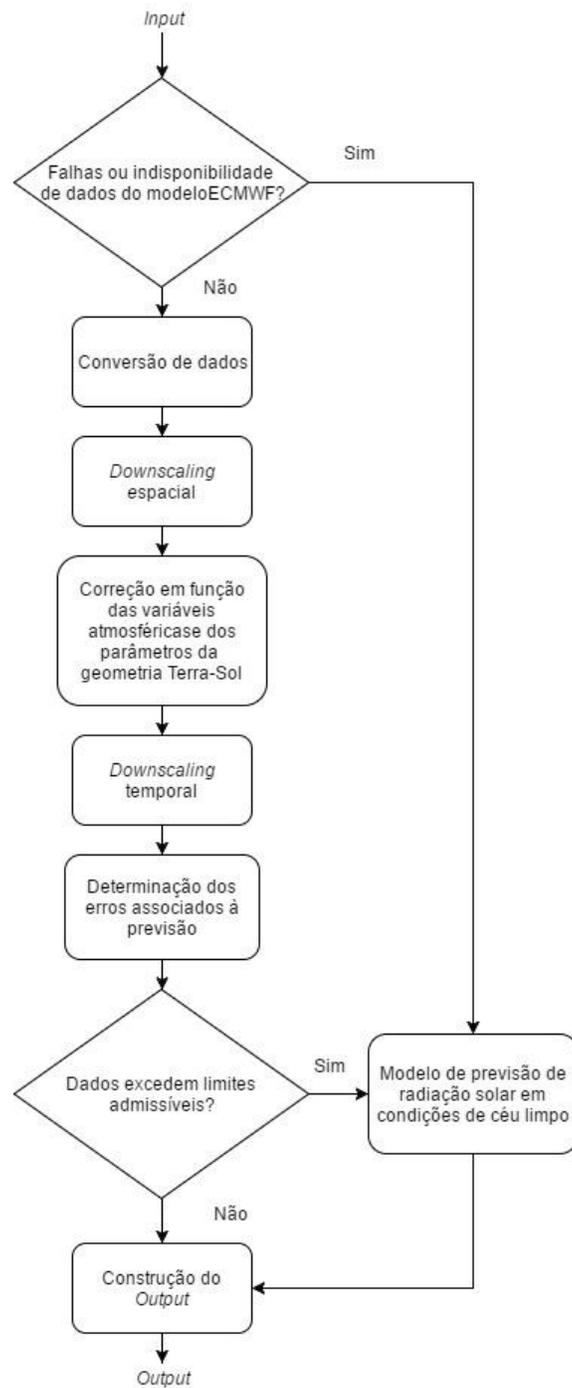


Figura 7.1 – Fluxograma do algoritmo a desenvolver.

Este modelo alternativo prevê a radiação solar global para condições de céu limpo em função de parâmetros conhecidos, tais como o dia do ano, o ângulo zenital e a localização, ao contrário de outras variáveis atmosféricas caso não exista instrumentação instalada no local de interesse. Assim, mesmo que não seja possível fazer uma previsão adequada, obtém-se uma previsão da irradiação

que seria de esperar em condições de céu limpo para um determinado período. Estes modelos servem assim, como um indicador da produção máxima expectável de um sistema de energia solar. O algoritmo a desenvolver irá tirar partido de um ou mais modelos de radiação solar em condições de céu limpo de acordo com a escolha do utilizador que deverá ser feita em função dos parâmetros conhecidos para o local ou da complexidade que este queira dar ao cálculo da estimativa. Dos modelos estudados até este ponto os modelos à escolha seriam o modelo ASHRAE como modelo cujos parâmetros de entrada são bem estabelecidos ou o modelo SMARTS que é um modelo um pouco mais elaborado. Estes modelos permitirão, assim, produzir previsões de irradiação solar global máxima aquando da falha na recolha ou nos próprios dados do modelo do ECMWF.

Existindo já uma primeira versão deste algoritmo em linguagem MATLAB esta deverá ser desenvolvida e melhorada e poderá ser futuramente integrada num modelo global de gestão otimizada de energia ou de previsão da produção em sistemas de energia solar térmica de média/baixa temperatura. No Anexo VII encontra-se o código MATLAB base para as análises apresentadas nesta dissertação e que será posteriormente adaptado no decurso do desenvolvimento do algoritmo.

7.3. Formato de dados de saída do algoritmo

O algoritmo terá como valores de saída, para além das previsões de meia em meia hora de irradiação solar global e temperatura média do ar e suas estimativas de erro, o local a que se referem as previsões, as datas de início dos dados de previsão, o modelo global de base utilizado e uma variável de estado codificada por código de erro que sinalizará eventos ou ocorrências.

De forma a ter um *output* simples e de fácil leitura será evitada a utilização de separadores decimais, o que permite a utilização de diferentes tipos de pós-processamento e/ou ferramentas informáticas independentemente de utilizarem o ponto ou a vírgula como separador, o que terá de ser definido pelo utilizador. Não será inserida uma coluna do tempo visto estar definido *a priori* que os valores das diferentes grandezas correspondem a intervalos de 30 minutos para um período total de 72 horas, permitindo uma redução do tamanho do ficheiro de *output*. Este ficheiro poderá ser no formato .dat, .xml ou .xlsx e terá como nome a designação dada ao local de instalação (LOCAL) assim como a data constituída pelos campos do ano (YYYY), mês (MM), dia (DD) e hora (HH) da seguinte forma: LOCAL_YYYYMMDDHH.

O ficheiro final apresentará o nome designado ao local da instalação (LOCAL), ao país (PAÍS) e o acrónimo do modelo de previsão utilizado (MODELO) em formato de texto com 8 caracteres no máximo, assim como a informação da latitude (LAT) e longitude (LON) do local em graus (°) com referência ao Equador e meridiano de Greenwich, respetivamente. As latitudes do hemisfério sul e longitudes a oeste do meridiano de Greenwich assumem valores negativos e têm uma gama de valores de $-90 \leq \text{LAT} \leq 90^\circ$ e $-180 \leq \text{LON} \leq 180^\circ$, respetivamente, sendo apresentadas como um número inteiro com precisão às centésimas de milésima de grau (°) sem utilização de separador decimal. Por exemplo, o valor LAT de 3856781 corresponde a $38,56781^\circ$ de latitude. O cabeçalho contém ainda a altitude do local de instalação (ALT) medida em relação ao nível da água do mar em metros e com uma gama de valores de $0 \leq \text{ALT} \leq 8848$ m representado como um número inteiro e a data e hora de lançamento da previsão do modelo global na forma YYYYMMDDHH.

De seguida apresentará as colunas com a irradiação solar global no plano horizontal (RGHI) correspondente a um período de 30 minutos em J/m^2 e com uma gama de valores admissíveis de $0 \leq \text{RGHI} \leq 2458980 \text{ J/m}^2$ representada por um número inteiro e a temperatura média do ar (TAIR)

que corresponde à temperatura média do ar a 2 metros acima do solo num período de 30 minutos em °C com uma gama de valores admissíveis de $-50 \leq \text{TAIR} \leq 55$ °C e representada por um número inteiro com precisão às décimas de °C sem utilização de separador decimal. Por exemplo, o valor 237 corresponde a 23,7°C de temperatura média do ar.

O ficheiro apresentará ainda os erros associados às previsões de radiação (D_RGHI) e de temperatura (D_TAIR) em percentagem (%) representados por números inteiros com precisão às centésimas, permitindo aferir a confiabilidade da previsão e, para uma determinada meia hora de registo, definir os intervalos $[\text{RGHI} - \text{D_RGHI}\%, \text{RGHI} + \text{D_RGHI}\%]$ no caso da radiação solar e $[\text{TAIR} - \text{D_TAIR}\%, \text{TAIR} + \text{D_TAIR}\%]$ no caso da temperatura, respeitando os valores admissíveis das grandezas. Por exemplo, o valor 237 corresponde a um erro de 2,37%.

A variável de estado codificada (FLAG) (codificação binária) será utilizada para sinalizar problemas com a geração dos valores de previsão. Esta toma o valor 0 no caso de não haver qualquer tipo de ocorrência na geração da previsão ou, caso contrário, é determinada pela soma de um ou mais valores de F_i de acordo com a chave apresentada na Tabela 7.1. Por exemplo, FLAG = 13 indica que, nessa linha de registo, se verificaram as ocorrências 1, 3 e 4 ($13 = 1 + 4 + 8 = 00001101$ em binário). A Tabela 7.1 poderá ser atualizada ou modificada posteriormente conforme as necessidades do algoritmo ou utilizador, na fase de implementação do algoritmo e em função do local de instalação. Quando ocorre a ausência ou erro nos valores das diferentes grandezas os campos numéricos são preenchidos por um código de erro (ERRORCODE) correspondente ao valor inteiro -9999.

Tabela 7.1 - Descrição e atributos da variável de estado codificada (FLAG).

i	Descrição	F_i
1	Ausência de valores de previsão de radiação global	1
2	Valor de RGHI fora dos limites admissíveis	2
3	Valor de RGHI estimado por modelo simplificado	4
4	Ausência de valores de previsão de temperatura do ar	8
5	Valor de TAIR fora dos limites admissíveis	16
6	Valor de TAIR estimado por interpolação	32

Assim, os dados são organizados em 5 colunas e 146 linhas em que as primeiras duas linhas são o cabeçalho e as restantes 144 linhas contêm os dados de previsão, correspondendo cada linha a um período de meia hora com início na data/hora indicada no cabeçalho. No formato de texto apenas é utilizado o espaço como separador de campos, não sendo utilizados separadores decimais e omitindo a coluna de tempo (hora) dos registos (linhas) como já tinha sido referido. A estrutura dos dados de saída da previsão é a seguinte:

```

LOCAL PAIS LAT LON ALT
MODELO YYYY MM DD HH
RGHI D_RGHI TAIR D_TAIR FLAG
RGHI D_RGHI TAIR D_TAIR FLAG
... ..

```

Como exemplo, foi gerado um ficheiro de exemplo de *output* para as primeiras 24 horas de previsão do dia 1 de maio de 2016 em Évora, o qual é apresentado no Anexo VIII.

8. Conclusão

Este trabalho consistiu num estudo inicial que irá permitir o posterior desenvolvimento de um algoritmo de previsão de radiação solar, o qual poderá ser integrado num modelo global de gestão otimizada de energia ou de previsão da produção em sistemas de energia solar, estando integrado no âmbito do contrato de prestação de serviços da Universidade de Évora com a empresa Warmhole, Lda.

Este algoritmo tem como *input* dados horários de previsão meteorológica gerados pelo modelo operacional de previsão numérica do tempo do ECMWF, que tem atualmente uma resolução espacial de cerca de 9 km. Os dados de previsão de irradiação solar global obtidos deste modelo foram analisados e comparados a dados de medições realizados em Évora e Sines. Foram estudados vários métodos de *downscaling* espacial para obter dados de previsão de radiação solar e temperatura do ar em locais específicos a definir pelo utilizador, que mostraram apresentar valores de previsão de irradiação solar global muito próximos dos valores medidos e diferenças entre dados de previsão e medição muito próximas independentemente do método de *downscaling* espacial utilizado para os quatro pontos mais próximos ao local de interesse tendo sido, assim, definido o *downscaling* espacial através da interpolação linear dupla como o método a utilizar para a restante análise, visto ser também este o método recomendado pelo ECMWF. Foram ainda desenvolvidos métodos numéricos para a realização do *downscaling* temporal dos dados horários de previsão de radiação e temperatura do ar para períodos de meia hora, que se mostraram consistentes com os valores horários previstos e valores de meia em meia hora observados.

Verificou-se que os dados do ECMWF tendem a subestimar a irradiação solar global para valores de índice de claridade elevados (calculados com dados de medição de irradiação solar global superiores ou iguais a 70%), calculados com os dados de medição, podendo as diferenças relativas médias diárias entre previsão e medição de radiação solar global ser consideradas aproximadamente constantes ao longo de 3 dias de previsão em condições de céu limpo, com valores médios de -1,02% e desvio padrão máximo de 3,56% em Évora e -2,27% e desvio padrão máximo de 5,10% em Sines. O desvio padrão tende, no entanto, a aumentar com o tempo de previsão, para além disso, o desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição tende a aumentar para valores de índice de claridade inferiores.

Foi analisada a influência de diversas variáveis atmosféricas e da geometria Terra-Sol no valor das diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global de forma a que se possa desenvolver uma metodologia para a correção dos valores previstos a ser aplicada no algoritmo de previsão de radiação solar. Observou-se que as diferenças com maior impacto na captação e conversão de energia estão associadas a um índice de claridade intermédio, entre 40% e 70%, calculado com os valores de irradiação solar global previstos, e horas próximas do meio dia solar (ângulos de zénite menores), caracterizados pela combinação de valores de irradiação solar global elevados e existência de nuvens difíceis de prever pelo modelo. As diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global mostraram ainda uma relação com os valores previstos pelo ECMWF de temperatura média do ar (valores de diferença superiores e positivos para valores de temperatura superiores), humidade relativa no caso de Évora (ligeira tendência para diferenças superiores e positivas para valores de humidade relativa mais baixos) e coluna de água (ligeira tendência para diferenças superiores e positivas para valores de coluna de água superiores). No entanto, estas tendências podem diminuir significativamente após a correção da irradiação solar

global prevista com o índice de claridade, uma vez que estas variáveis estão correlacionadas pela própria dinâmica da atmosfera.

Na ocorrência de falhas nos dados ou na sua recolha do servidor do ECMWF, consideraram-se diversos modelos simples de radiação solar em condições de céu limpo que permitem ao algoritmo fornecer uma estimativa da irradiação solar global. Estes modelos caracterizam-se pela sua simplicidade em termos de *input* (utilizam apenas *inputs* possíveis de obter *offline*) e pela sua atual utilização em diversas aplicações. O modelo de transferência radiativa SMARTS seguido pelo modelo ASHRAE, que é mais simples, para condições de céu limpo, mostraram ser os mais adequados de entre os modelos estudados.

Foi ainda desenvolvida uma primeira versão do algoritmo de previsão cujos *outputs* serão formatados de modo a que sejam de fácil leitura e utilização em diferentes aplicações ou plataformas informáticas.

No futuro, será necessário estender este estudo a outros locais com diferentes condições climatéricas e orográficas permitindo o desenvolvimento de correções das previsões de radiação solar global e temperatura média do ar de acordo com outras variáveis determinadas ou previstas como, por exemplo, o índice de claridade, para cada local, requerendo ainda uma validação do algoritmo com dados de medição. Será considerada também a inclusão nesta análise de outros métodos de previsão de radiação solar em condições de céu limpo para além dos apresentados neste trabalho e a aplicação ou determinação de coeficientes mensais mais adequados no modelo ASHRAE para definir o mais indicado a introduzir no algoritmo no caso de falhas na previsão ou recolha desta do ECMWF. Para além disto, será ainda feito um estudo semelhante a este por forma a determinar as correções possíveis dos valores de temperatura média do ar que serão previstos pelo algoritmo.

Espera-se que a integração deste algoritmo em modelos de gestão de sistemas solares térmicos ou outros sistemas de conversão de energia solar (como sistemas fotovoltaicos, por exemplo), permita uma melhor gestão da produção de energia renovável e um melhor dimensionamento e condução dos sistemas auxiliares convencionais.

Referências

- [1] Urraca, R., Martinez-de-Pison, E., Sanz-Garcia, A., Antonanzas, J., e Antonanzas-Torres, F., 2016, "Estimation Methods for Global Solar Radiation: Case Study Evaluation of Five Different Approaches in Central Spain," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, (March).
- [2] Huang, J., e Davy, R. J., 2016, "Predicting Intra-Hour Variability of Solar Irradiance Using Hourly Local Weather Forecasts," *Sol. Energy*, **139**, pp. 633–639.
- [3] REN21, 2016, *Renewables 2016 Global Status Report*.
- [4] Iqbal, M., 1983, *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press Inc.
- [5] Paulescu, M., Paulescu, E., Gravila, P., e Badescu, V., 2013, "Solar Radiation Measurements," *Weather Modeling and Forecasting of PV Systems Operation*, pp. 17–42.
- [6] Besharat, F., Dehghan, A. A., e Faghih, A. R., 2013, "Empirical Models for Estimating Global Solar Radiation: A Review and Case Study," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **21**, pp. 798–821.
- [7] Angstrom, A., 1924, "Solar and Terrestrial Radiation. Report to the International Commission for Solar Research on Actinometric Investigations of Solar and Atmospheric Radiation," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **50**(210), pp. 121–126.
- [8] Prescott, J. A., 1940, "Evaporation from Water Surface in Relation to Solar Radiation," *Trans. R. Soc. South Aust.*, **64**, pp. 114–118.
- [9] Black, J. N., 1956, "The Distribution of Solar Radiation over the Earth's Surface," *Arch. für Meteorol. Geophys. und Bioklimatologie Ser. B*, **7**(2), pp. 165–189.
- [10] Supit, I., e van Kappel, R. R., 1998, "A Simple Method to Estimate Global Radiation," *Sol. Energy*, **63**(3), pp. 147–160.
- [11] Bristow, K. L., e Campbell, G. S., 1984, "On the Relationship between Incoming Solar Radiation and Daily Maximum and Minimum Temperature," *Agric. For. Meteorol.*, **31**(2), pp. 159–166.
- [12] Hargreaves, G. H., e Samani, Z. A., 1982, "Estimating Potential Evapotranspiration," *J. Irrig. Drain. Div.*, **108**(3), pp. 225–230.
- [13] Jong, R. De, e Stewart, D. W., 1993, "Estimating Global Solar Radiation from Common Meteorological Observations in Western Canada," *Can. J. Plant Sci.*, **73**(2), pp. 509–518.
- [14] Liu, D. ., e Scott, B. ., 2001, "Estimation of Solar Radiation in Australia from Rainfall and Temperature Observations," *Agric. For. Meteorol.*, **106**(1), pp. 41–59.
- [15] Martí, P., e Gasque, M., 2011, "Improvement of Temperature-Based ANN Models for Solar Radiation Estimation through Exogenous Data Assistance," *Energy Convers. Manag.*, **52**(2), pp. 990–1003.
- [16] Dahmani, K., Notton, G., Voyant, C., Dizene, R., Nivet, M. L., Paoli, C., e Tamas, W., 2016, "Multilayer Perceptron Approach for Estimating 5-Min and Hourly Horizontal Global Irradiation from Exogenous Meteorological Data in Locations without Solar Measurements," *Renew. Energy*, **90**, pp. 267–282.
- [17] Siqueira, A. N., Tiba, C., e Fraidenaich, N., 2010, "Generation of Daily Solar Irradiation by Means of Artificial Neural Net Works," *Renew. Energy*, **35**(11), pp. 2406–2414.
- [18] Antonanzas-Torres, F., Urraca, R., Antonanzas, J., Fernandez-Ceniceros, J., e Martinez-de-Pison, F. J., 2015, "Generation of Daily Global Solar Irradiation with Support Vector Machines for Regression," *Energy Convers. Manag.*, **96**, pp. 277–286.
- [19] Antonanzas, J., Urraca, R., Martinez-de-Pison, F. J., e Antonanzas-Torres, F., 2015, "Solar Irradiation Mapping with Exogenous Data from Support Vector Regression Machines Estimations," *Energy Convers. Manag.*, **100**, pp. 380–390.
- [20] Urraca, R., Antonanzas, J., Alia-Martinez, M., Martinez-de-Pison, F. J., e Antonanzas-Torres,

- F., 2016, "Smart Baseline Models for Solar Irradiation Forecasting," *Energy Convers. Manag.*, **108**, pp. 539–548.
- [21] Kisi, O., 2014, "Modeling Solar Radiation of Mediterranean Region in Turkey by Using Fuzzy Genetic Approach," *Energy*, **64**, pp. 429–436.
- [22] Salcedo-Sanz, S., Casanova-Mateo, C., Pastor-Sánchez, A., e Sánchez-Girón, M., 2014, "Daily Global Solar Radiation Prediction Based on a Hybrid Coral Reefs Optimization – Extreme Learning Machine Approach," *Sol. Energy*, **105**, pp. 91–98.
- [23] Urraca, R., Antonanzas, J., Martínez-de-Pisón, F. J., e Antonanzas-Torres, F., 2015, "Estimation of Solar Global Irradiation in Remote Areas," *J. Renew. Sustain. Energy*, **7**(2), p. 23136.
- [24] Engerer, N. A., e Mills, F. P., 2015, "Validating Nine Clear Sky Radiation Models in Australia," *Sol. Energy*, **120**, pp. 9–24.
- [25] Hosobuchi, H., Yoshida, H., e Uetani, Y., 2005, "Calculation of the Heating and Cooling Load of Buildings Using a Sky Radiance Distribution Model," *9th International IBPSA Conference*.
- [26] Gueymard, C., 1989, "An Atmospheric Transmittance Model for the Calculation of the Clear Sky Beam, Diffuse and Global Photosynthetically Active Radiation," *Agric. For. Meteorol.*, **45**(3–4), pp. 215–229.
- [27] Svendsen, H., Jensen, H. E., Jensen, S. E., e Mogensen, V. O., 1990, "The Effect of Clear Sky Radiation on Crop Surface Temperature Determined by Thermal Thermometry," *Agric. For. Meteorol.*, **50**(3), pp. 239–243.
- [28] Dehghan, A., Prasad, A. A., Sherwood, S. C., e Kay, M., 2014, "Evaluation and Improvement of TAPM in Estimating Solar Irradiance in Eastern Australia," *Sol. Energy*, **107**, pp. 668–680.
- [29] Woyte, A., Belmans, R., e Nijs, J., 2007, "Fluctuations in Instantaneous Clearness Index: Analysis and Statistics," *Sol. Energy*, **81**(2), pp. 195–206.
- [30] Calbó, J., González, J.-A., e Pagès, D., 2001, "A Method for Sky-Condition Classification from Ground-Based Solar Radiation Measurements," *J. Appl. Meteorol.*, **40**(12), pp. 2193–2199.
- [31] Huang, J., Shi, L., e Chen, Y., 2013, "Staff Retention after the Privatization of Township-Village Health Centers: A Case Study from the Haimen City of East China," *BMC Health Serv. Res.*, **13**(1), p. 136.
- [32] Yang, D., Jirutitijaroen, P., e Walsh, W. M., 2012, "Hourly Solar Irradiance Time Series Forecasting Using Cloud Cover Index," *Sol. Energy*, **86**(12), pp. 3531–3543.
- [33] Engerer, N. A., e Mills, F. P., 2014, "KPV: A Clear-Sky Index for Photovoltaics," *Sol. Energy*, **105**, pp. 679–693.
- [34] Ineichen, P., 2006, "Comparison of Eight Clear Sky Broadband Models against 16 Independent Data Banks," *Sol. Energy*, **80**(4), pp. 468–478.
- [35] Gueymard, C., 1993, "Critical Analysis and Performance Assessment of Clear Sky Solar Irradiance Models Using Theoretical and Measured Data," *Sol. Energy*, **51**(2), pp. 121–138.
- [36] Page, J., 1986, *Prediction of Solar Radiation on Inclined Surfaces*, D. Reidel Publishing Company.
- [37] Badescu, V., Gueymard, C. A., Cheval, S., Oprea, C., Baci, M., Dumitrescu, A., Iacobescu, F., Milos, I., e Rada, C., 2012, "Computing Global and Diffuse Solar Hourly Irradiation on Clear Sky. Review and Testing of 54 Models," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **16**(3), pp. 1636–1656.
- [38] Gueymard, C. A., 2012, "Clear-Sky Irradiance Predictions for Solar Resource Mapping and Large-Scale Applications: Improved Validation Methodology and Detailed Performance Analysis of 18 Broadband Radiative Models," *Sol. Energy*, **86**(8), pp. 2145–2169.
- [39] Gueymard, C. A., 2008, "REST2: High-Performance Solar Radiation Model for Cloudless-Sky Irradiance, Illuminance, and Photosynthetically Active Radiation – Validation with a Benchmark Dataset," *Sol. Energy*, **82**(3), pp. 272–285.

- [40] Ineichen, P., 2008, "A Broadband Simplified Version of the Solis Clear Sky Model," *Sol. Energy*, **82**(8), pp. 758–762.
- [41] Hoyt, D. V., 1978, "A Model for the Calculation of Solar Global Insolation," *Sol. Energy*, **21**(1), pp. 27–35.
- [42] Bird, R. E., e Hulstrom, R. L., 1980, "Direct Insolation Models," *Sol. Energy Res. Inst.*, pp. 1–43.
- [43] Bird, R. E., e Hulstrom, R. L., 1981, "A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces," *Sol. Energy Res. Inst.*
- [44] Bird, R. E., e Hulstrom, R. L., 1981, "Review, Evaluation, and Improvement of Direct Irradiance Models," *Trans. ASME J. Sol. Eng.*, (103), pp. 182–192.
- [45] Rigollier, C., Bauer, O., e Wald, L., 2000, "On the Clear Sky Model of the ESRA — European Solar Radiation Atlas — with Respect to the Heliosat Method," *Sol. Energy*, **68**(1), pp. 33–48.
- [46] Molineaux, B., e Ineichen, P., 1996, "On the Broad Band Transmittance of Direct Irradiance in a Cloudless Sky and Its Application to the Parameterization of Atmospheric Turbidity," *Sol. Energy*, **56**(6), pp. 553–563.
- [47] Rothman, L. S., Gordon, I. E., Babikov, Y., Barbe, A., Chris Benner, D., Bernath, P. F., Birk, M., Bizzocchi, L., Boudon, V., Brown, L. R., Campargue, A., Chance, K., Cohen, E. A., Coudert, L. H., Devi, V. M., Drouin, B. J., Fayt, A., Flaud, J. M., Gamache, R. R., Harrison, J. J., Hartmann, J. M., Hill, C., Hodges, J. T., Jacquemart, D., Jolly, A., Lamouroux, J., Le Roy, R. J., Li, G., Long, D. A., Lyulin, O. M., Mackie, C. J., Massie, S. T., Mikhailenko, S., Müller, H. S. P., Naumenko, O. V., Nikitin, A. V., Orphal, J., Perevalov, V., Perrin, A., Polovtseva, E. R., Richard, C., Smith, M. A. H., Starikova, E., Sung, K., Tashkun, S., Tennyson, J., Toon, G. C., Tyuterev, V. G., e Wagner, G., 2013, "The HITRAN2012 Molecular Spectroscopic Database," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **130**, pp. 4–50.
- [48] Fenn, R. W., Clough, S. A., Gallery, W. O., Good, R. E., Kneizys, F. X., Mill, J. D., Rothman, L. S., Shettle, E. P., e Volz, F. E., 1985, "Optical and Infrared Properties of the Atmosphere," *Handb. Geophys. Sp. Environ.*, pp. 1–80.
- [49] Myers, D. R., e Gueymard, C. a, 2004, "Description and Availability of the SMARTS Spectral Model for Photovoltaic Applications," *Proceedings of SPIE -The International Society for Optical Engineering*.
- [50] Haltiner, G. J., 1971, *Numerical Weather Prediction*, Wiley.
- [51] Al-Yahyai, S., Charabi, Y., e Gastli, A., 2010, "Review of the Use of Numerical Weather Prediction (NWP) Models for Wind Energy Assessment," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **14**(9), pp. 3192–3198.
- [52] DWD, 2009, "Deutschen Wetterdienstes. Annual Report."
- [53] NCAR, 2008, "National Center for Atmospheric Research. Annual Report."
- [54] Lorenz, E., e Heinemann, D., 2012, "Prediction of Solar Irradiance and Photovoltaic Power," *Comprehensive Renewable Energy*, Elsevier, pp. 239–292.
- [55] Mathiesen, P., e Kleissl, J., 2011, "Evaluation of Numerical Weather Prediction for Intra-Day Solar Forecasting in the Continental United States," *Sol. Energy*, **85**(5), pp. 967–977.
- [56] Armstrong, M. A., 2000, "Comparison of MM5 Forecast Shortwave Radiation with Data Obtained from the Atmospheric Radiation Measurement Program," *Master Sience Sch. Pap.*
- [57] Dudhia, J., 1989, "Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model," *J. Atmos. Sci.*, **46**(20), pp. 3077–3107.
- [58] Perez, R., Lorenz, E., Pelland, S., Beauharnois, M., Van Knowe, G., Hemker, K., Heinemann, D., Remund, J., Müller, S. C., Traunmüller, W., Steinmayer, G., Pozo, D., Ruiz-Arias, J. A., Lara-Fanego, V., Ramirez-Santigosa, L., Gaston-Romero, M., e Pomares, L. M., 2013, "Comparison

- of Numerical Weather Prediction Solar Irradiance Forecasts in the US, Canada and Europe,” *Sol. Energy*, **94**, pp. 305–326.
- [59] Breitzkreuz, H., Schroedter-Homscheidt, M., Holzer-Popp, T., e Dech, S., 2009, “Short-Range Direct and Diffuse Irradiance Forecasts for Solar Energy Applications Based on Aerosol Chemical Transport and Numerical Weather Modeling,” *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **48**(9), pp. 1766–1779.
- [60] Lorenz, E., Hurka, J., Heinemann, D., e Beyer, H. G., 2009, “Irradiance Forecasting for the Power Prediction of Grid-Connected Photovoltaic Systems,” *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, **2**(1), pp. 2–10.
- [61] Ruiz-Arias, J. A., Pozo-Vázquez, D., Santos-Alamillos, F. J., Lara-Fanego, V., e Tovar-Pescador, J., 2011, “A Topographic Geostatistical Approach for Mapping Monthly Mean Values of Daily Global Solar Radiation: A Case Study in Southern Spain,” *Agric. For. Meteorol.*, **151**(12), pp. 1812–1822.
- [62] Park, J.-K., Das, A., e Park, J.-H., 2015, “A New Approach to Estimate the Spatial Distribution of Solar Radiation Using Topographic Factor and Sunshine Duration in South Korea,” *Energy Convers. Manag.*, **101**, pp. 30–39.
- [63] Bojanowski, J. S., Vrieling, A., e Skidmore, A. K., 2014, “A Comparison of Data Sources for Creating a Long-Term Time Series of Daily Gridded Solar Radiation for Europe,” *Sol. Energy*, **99**, pp. 152–171.
- [64] ECMWF, “Who We Are.”
- [65] Badescu, V., 1998, “Verification of Some Very Simple Clear and Cloudy Sky Models to Evaluate Global Solar Irradiance,” *Sol. Energy*, **61**(4), pp. 251–264.
- [66] Fu, P., e Rich, P., 1999, “Design and Implementation of the Solar Analyst: An ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales,” *19th Annual ESRI User Conference*.
- [67] Hottel, H. C., 1976, “A Simple Model for Estimating the Transmittance of Direct Solar Radiation through Clear Atmospheres,” *Sol. Energy*, (18), pp. 129–134.
- [68] Liu, B. Y. H., e Jordan, R. C., 1960, “The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation,” *Sol. Energy*, **4**(3), pp. 1–19.
- [69] ASHRAE, 1972, “Handbook of Fundamentals,” pp. 1–602.
- [70] Gueymard, C. A., 2005, *USER ’ S MANUAL SMARTS*.
- [71] Kalogirou, S., 2009, “Solar Energy Engineering,” pp. 1–701.
- [72] Duffie, J. A., e Beckman, W. A., 2013, “Solar Engineering of Thermal Processes,” pp. 1–885.
- [73] Al-Sanea, S. A., Zedan, M. F., e Al-Ajlan, S. A., 2004, “Adjustment Factors for the ASHRAE Clear-Sky Model Based on Solar-Radiation Measurements in Riyadh,” *Appl. Energy*, **79**(2), pp. 215–237.
- [74] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., 2005, “ASHRAE Handbook of Fundamentals,” pp. 1–845.
- [75] Gueymard, C. A., 2010, “SMARTS Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine” [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/rredc/smarts/download.html>.
- [76] PSU/NCAR, 2015, “MM5.”
- [77] RAB, “WRF - The Weather Reserach & Forecasting Model.”
- [78] NOAA, “Global Forecast System (GFS).”
- [79] Persson, A., e Andersson, E., 2015, *User Guide to ECMWF Forecast Products*.
- [80] ECMWF, “Atmospheric Physics.”
- [81] Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., e Clough, S. A., 1997, “Radiative Transfer for Inhomogeneous Atmospheres: RRTM, a Validated Correlated-K Model for the Longwave,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, **102**(D14), pp. 16663–16682.

- [82] Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., e Collins, W. D., 2008, "Radiative Forcing by Long-Lived Greenhouse Gases: Calculations with the AER Radiative Transfer Models," *J. Geophys. Res.*, **113**(D13), p. D13103.
- [83] Morcrette, J.-J., Barker, H. W., Cole, J. N. S., Iacono, M. J., e Pincus, R., 2008, "Impact of a New Radiation Package, McRad, in the ECMWF Integrated Forecasting System," *Mon. Weather Rev.*, **136**(12), pp. 4773–4798.
- [84] ECMWF, 2016, "Part IV : Physical Processes," IFS Doc. – Cy38r1, (March), pp. 3–213.
- [85] Morcrette, J.-J., 1991, "Radiation and Cloud Radiative Properties in the European Centre for Medium Range Weather Forecasts Forecasting System," *J. Geophys. Res.*, **96**(D5), p. 9121.
- [86] Clough, S. A., Kneizys, F. X., e Davies, R. W., 1989, "Line Shape and the Water Vapor Continuum," *Atmos. Res.*, **23**(3–4), pp. 229–241.
- [87] Clough, S. A., Iacono, M. J., e Moncet, J.-L., 1992, "Line-by-Line Calculations of Atmospheric Fluxes and Cooling Rates: Application to Water Vapor," *J. Geophys. Res.*, **97**(D14), p. 15761.
- [88] Clough, S. A., e Iacono, M. J., 1995, "Line-by-Line Calculation of Atmospheric Fluxes and Cooling Rates: 2. Application to Carbon Dioxide, Ozone, Methane, Nitrous Oxide and the Halocarbons," *J. Geophys. Res.*, **100**(D8), p. 16519.
- [89] Ebert, E. E., e Curry, J. A., 1993, "An Intermediate One-Dimensional Thermodynamic Sea Ice Model for Investigating Ice-Atmosphere Interactions," *J. Geophys. Res.*, **98**(C6), p. 10085.
- [90] Fouquart, Y., 1987, "Radiative Transfer in Climate Modeling," *NATO Adv. Study Inst. Phys. Model. Simul. Clim. Clim. Chang.*, pp. 223–283.
- [91] Tegen, I., Hollrig, P., Chin, M., Fung, I., Jacob, D., e Penner, J., 1997, "Contribution of Different Aerosol Species to the Global Aerosol Extinction Optical Thickness: Estimates from Model Results," *J. Geophys. Res. Atmos.*, **102**(D20), pp. 23895–23915.
- [92] Unidata, "What Is NetCDF?"
- [93] Kipp&Zonen, "CM6B Pyranometer/ CM7B Albedometer Instruction Manual."
- [94] LI-COR, 2015, "LI-200R Pyranometer."
- [95] ArcGIS 9.2, 2007, "How Inverse Distance Weighed (IDW) Interpolation Works."
- [96] National Imagery and Mapping Agency, 1984, "WGS84."

Glossário

Absorção – A absorção em termos atmosféricos designa o processo de retenção de parte da radiação solar pelas nuvens, moléculas de gases e outras partículas presentes na atmosfera.

Albedo – Albedo é uma medida da fração de energia solar recebida por um planeta ou satélite que é refletida pelo mesmo. É uma medida da refletividade da superfície da Terra.

Calor Latente – Calor latente, também chamado de calor de transformação, é a grandeza física associada à quantidade de calor que uma unidade de massa de determinada substância deve receber ou ceder para mudar de fase.

Constante Solar – A constante solar, uma medida da densidade de fluxo, é o nome convencional para a radiação eletromagnética solar média (a irradiância solar) por unidade de área incidente num plano perpendicular aos raios, a uma distância de uma unidade astronómica (AU) do Sol (aproximadamente a distância média do Sol à Terra). $I_{sc} = 1366,1 \text{ W/m}^2$.

Diagrama de caixa – O diagrama de caixa é uma ferramenta para localizar e analisar a variação de uma variável em diferentes grupos de dados. Este é um gráfico no qual o eixo vertical representa a variável a ser analisada e o eixo horizontal um fator de interesse. Este gráfico apresenta os valores de mediana, quartis (quartil inferior, onde estão localizados 25% dos menores valores e quartil superior onde estão localizados 75% dos maiores valores), bigodes (fornecem informação sobre a dispersão da variável) e valores atípicos (dados que apresentam valores bastante díspares do conjunto).

Dispersão – Dispersão designa o fenómeno que causa o desvio de radiação de uma trajetória linear numa ou mais direções devido a pontos não uniformes no meio cuja radiação atravessa. A dispersão de Rayleigh é a dispersão da luz ou qualquer outra radiação eletromagnética por partículas muito menores que o comprimento de onda dos fótons dispersos, já a dispersão de Mie é dispersão de radiação eletromagnética por partículas esféricas.

Downscaling – *Downscaling* é a designação geral para o procedimento de realizar previsões a escalas menores a partir de informação existente para grandes escalas.

Escala Sinóptica – A escala sinóptica é uma escala de movimento atmosférico que tem em conta fenómenos com dimensões da ordem de algumas centenas de quilómetros e duração da ordem de um dia a meses. Nesta escala estão enquadrados: furacões, frentes frias, ciclones e anticiclones.

Espessura Ótica – A espessura ótica é uma quantidade adimensional que caracteriza a atenuação de radiação num meio.

Espectro Solar – O espectro solar é a distribuição de radiação eletromagnética emitida pelo sol. Embora o espectro solar compreenda essencialmente todo o espectro eletromagnético, 99% da energia está concentrada num intervalo de comprimentos de onda entre aproximadamente 250 nm e 4000 nm.

Mesoescala – Mesoescala é a escala de movimento atmosférico que tem em conta fenómenos atmosféricos menores que a escala sinóptica, porém maiores que a microescala. Os fenómenos desta escala têm dimensões da ordem de 1 km até cerca de 100 km. A duração característica é da

ordem de 1 hora a 1 dia. Nesta escala estão enquadrados os fenômenos: tornados, linhas de instabilidade, tempestades isoladas, conjuntos ou sistemas de nuvens, ilhas de calor e brisas.

Método de correlação k (*correlated-k method*) – O método de correlação k é uma técnica de cálculo de radiação em atmosferas não homogêneas utilizando dados médios ao longo do espectro.

Microescala – Microescala é a menor escala de movimento atmosférico que tem importância meteorológica. Os fenômenos que ocorrem nesta escala têm dimensões da ordem de 1 metro a 1 km, e duração da ordem de 1 segundo até cerca de 1 hora. Nesta escala estão enquadrados: processos de formação das gotas de chuva, dispersão de poluentes e interação no sistema solo-plantas e atmosfera.

Modelo Estocástico – Um modelo estocástico é um modelo matemático cujas variáveis respondem a uma distribuição específica. Tais modelos não oferecem soluções únicas, mas apresentam uma distribuição de soluções associadas a uma probabilidade, segundo uma determinada distribuição de probabilidades.

Piranómetro – Um piranómetro é um radiómetro desenhado para medir a radiação solar global. Pode também ser utilizado para medir radiação difusa ao instalar um sistema que bloqueie a componente direta da radiação solar.

Piréliometro – Um piréliometro é um radiómetro desenhado para medir radiação solar direta normal. Para isso necessita de um sistema de seguimento da posição do Sol.

Pressão de vapor – Em meteorologia, o termo pressão de vapor é usado para descrever a pressão parcial de vapor de água na atmosfera, mesmo que não esteja em equilíbrio.

Radiação Solar – A radiação solar é a designação dada à energia radiante emitida pelo Sol, em particular aquela que é transmitida sob a forma de radiação eletromagnética.

Radiação Difusa – A radiação solar difusa é a radiação solar recebida indiretamente, resultante da ação da dispersão nos constituintes da atmosfera e nas nuvens, nevoeiro, poeiras em suspensão e outros aerossóis.

Radiação Solar Direta – A radiação solar direta é a parte da radiação solar recebida diretamente do Sol através de raios solares.

Radiação Solar Global – A radiação solar global é a radiação solar total que atinge uma superfície, normalmente horizontal, sendo igual à soma da componente da radiação solar direta nesse plano e da componente difusa.

Radiação Solar no Topo da Atmosfera – A radiação solar no topo da atmosfera ou radiação solar extraterrestre é a radiação solar medida imediatamente acima da atmosfera terrestre.

Radiómetro – Um radiómetro é um instrumento que serve para medir ou detetar energia radiante.

Reflexão – A reflexão é o fenómeno pelo qual um raio de luz que incide sobre uma superfície é refletido. É, portanto, a mudança de direção de um raio ou de uma onda que ocorre na superfície de separação entre dois meios, acabando por regressar ao meio inicial.

Sistema baroclínico – Um sistema baroclínico é um sistema no qual superfícies de pressão constante intersectam superfícies de densidade constante. Uma atmosfera baroclínica é aquela em que a densidade depende quer da temperatura quer da pressão.

Tecnologia de concentração solar – A tecnologia de concentração solar utiliza espelhos ou lentes para concentrar a radiação solar em componentes térmicos ou fotovoltaicos.

Tecnologia fotovoltaica – A tecnologia fotovoltaica é uma tecnologia que converte a radiação solar diretamente em eletricidade através do efeito fotovoltaico.

Tecnologia solar térmica – A tecnologia solar térmica envolve o aproveitamento de energia solar convertendo-a em calor ao transferi-la para um fluido de transferência de calor, normalmente água, óleo térmico ou um gás.

Transmissividade – Transmissividade é uma medida da capacidade de um material ou meio transmitir energia eletromagnética.

Transferência radiativa – Em física, dá-se o nome de transferência radiativa ao processo de propagação de energia na forma de radiação eletromagnética. A transferência radiativa é influenciada pela absorção, emissão e dispersão da radiação no meio em que esta se propaga.

Turbidez – Turbidez é uma propriedade física dos fluidos que se traduz na redução da sua transparência devido à presença de materiais em suspensão que interferem com a passagem da radiação através do fluido. Coeficiente de turbidez atmosférica é um expoente que traduz a dependência espectral da espessura óptica dos aerossóis com o comprimento de onda da radiação incidente. Exemplos de coeficientes de turbidez são o coeficiente de Ångström e o coeficiente de Schüepp.

Zero-offset – *Zero-offset* é o valor de tensão elétrica gerada por um radiómetro quando não existe radiação solar incidente. Isto pode-se dever a trocas de calor entre o radiómetro e o ambiente (variação da temperatura do corpo do sensor), e troca de radiação térmica (infravermelho) entre o sensor e o ambiente ou presença de radiação térmica de fontes artificiais.

Anexo I - Ficheiro de exemplo de *input* do modelo SMARTS

```
'Évora'  
2  
38.567687 0.290 0  
1  
'MLS'  
1  
1  
1  
370  
0  
'S&F_RURAL'  
0  
0.084  
41  
0  
280 4000 1.0 1366.1  
0  
0  
0  
0  
0  
3  
2016 5 1 5.750000 38.567687 -7.911704 0
```


Anexo II - Ficheiro de exemplo de *output* do modelo SMARTS

***** SMARTS, version 2.9.5 *****

Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine

Chris A. Gueymard, Solar Consulting Services

December 2005

This model is documented in FSEC Report PF-270-95
and in a Solar Energy paper, vol. 71, No.5, 325-346 (2001)

NOTE: These references describe v. 2.8 or earlier!!!
See the User's Manual for details on the considerable
changes that followed...

Reference for this run: Évora

* ATMOSPHERE : MLS AEROSOL TYPE: S&F_RURAL

* INPUTS:

Pressure (mb) = 980.440 Ground Altitude (km) = 0.2900

Height above ground (km) = 0.0000

Relative Humidity (%) = 73.234 Precipitable Water (cm) = 2.5549

Ozone (atm-cm) = 0.3312 or 331.2 Dobson Units

AEROSOLS: Optical Depth at 500 nm = 0.0840 Optical depth at 550 nm = 0.0734

Angstrom's Beta = 0.0314 Schuepp's B = 0.0365

Meteorological Range (km) = 131.3 Visibility (km) = 100.6

Alpha1 = 0.9541 Alpha2 = 1.4191 Mean Angstrom's Alpha = 1.1866

Season = SPRING/SUMMER

* TEMPERATURES:

Instantaneous at site's altitude = 292.8 K

Daily average (reference) at site's altitude = 292.8 K

Stratospheric Ozone and NO2 (effective) = 231.8 K

** WARNING #13 *****

\\ Ground reflectance data for RED_BRICK

\\ extend only from 0.3000 to 4.0000 μm ,

\\ whereas the wavelength limits for this run are 0.2800 and 4.0000 μm .

\\ Consequently, reflectance is fixed at 0.028 below 0.3000 μm and at 0.382 above 4.0000 μm .

Spectral ZONAL albedo data: RED_BRICK
with a reflection process: NON_LAMBERTIAN

=====

* SOLAR POSITION (deg.):

Zenith Angle (apparent) = 88.466 Azimuth (from North) = 71.38

RELATIVE OPTICAL MASSES:

- Rayleigh = 22.215
- Water Vapor = 29.455
- Ozone = 12.691
- NO2 = 12.201
- Aerosols = 28.068

Results below are for this specific day:

Year = 2016 Month = 5 Day = 1 Hour (LST) = 5.750 Day of Year = 122

In Universal Time:

Day (UT) = 1 Hour (UT) = 5.750

Julian Day = 2457509.750 Declination = 15.215 deg. Radius vector = 1.00765 Equation of Time (min) = 2.949

Local Apparent Time (or Solar Time): 5.272

CO2 Mixing Ratio (ppmv): 370.0

Total column abundances (atm-cm) for all gases except H2O, and for normal/standard conditions:

BrO CH2O CH4 ClNO3 CO CO2 HNO2 HNO3 NH3

0.2500E-05 0.3000E-03 0.1229E+01 0.1200E-03 0.8366E-01 0.2873E+03 0.1000E-03 0.3825E-03
0.1582E-03

NO NO2 NO3 N2 N2O O2 O3 O4 SO2

0.3153E-03 0.2178E-03 0.5000E-04 0.3488E+06 0.2307E+00 0.1623E+06 0.3312E+00 0.1623E+06
0.1005E-03

* * * * *

** SPECTRUM:

Total (0-100 μ m) Extraterrestrial Irradiance used here = 1345.44 W/m²

(i.e., 0.9849 times the selected solar constant, 1366.10 W/m², due to the actual Sun-Earth distance.)

Source for selected solar spectrum: Gueymard_2003

Wavelength Range = 280.0 to 4000.0 nm; Number of Wavelengths = 2002

*** BROADBAND IRRADIANCES (W/m²):

* DIRECT BEAM AT NORMAL INCIDENCE:

Extraterrestrial = 1327.64 Terrestrial = 99.99 Atmospheric Transmittance = 0.0753

* FOR THE HORIZONTAL PLANE:

Direct Beam = 2.68 Diffuse = 11.93 Global = 14.60 Clearness index, KT = 0.0109

Diffuse irradiance origination details:

Sky diffuse = 11.78 Back-scattered diffuse = 0.15

=====

Anexo III - *Script* para recolha dos dados do ECMWF

```
1 #!/bin/ksh
2 #@ shell = /usr/bin/ksh
3 #@ class = normal
4 #@ job_name = retrieve_grib
5 #@ output = $(job_name).$(host).out
6 #@ error = $(job_name).$(host).out
7 #@ notification = always
8 #@ notify_user = rsal@uevora.pt
9 #@ environment = COPY_ALL
10 #@ job_cpu_limit = 03:00:00,03:00:00
11 #@ wall_clock_limit = 03:00:00,03:00:00
12 #@ queue
13 TMPDIR=$SCRATCH ;export TMPDIR
14 TEMP=$HOME/temp ;export TEMP
15 set -exa
16 cd $TMPDIR
17 DATE1=20161101;export DATE1
18 DATE2=20161103;export DATE2
19 #
20 mars << **EOF**
21 retrieve,
22 class=od,
23 type=fc,
24 time=00:00:00,
25 step=0/1/2/3/4/5/6/7/8/9/10/11/12/13/14/15/16/17/18/19/20/21/22/23/24/25/26/27/28/2
9/30/31/32/33/34/35/36/37/38/39/40/41/42/43/44/45/46/47/48/49/50/51/52/53/54/55/56/57/
58/59/60/61/62/63/64/65/66/67/68/69/70/71/72/73/74/75/76/77/78/79/80/81/82/83/84/85/8
6/87/88/89/90/93/96/99/102/105/108/111/114/117/120/123/126/129/132/135/138/141/144/1
50/156/162/168/174/180/186/192/198/204/210/216/222/228/234/240,
26 expver=1,
27 stream=oper,
28 levtype=sfc,
29 repres=ll,
30 grid=0.125/0.125,
31 area=43/350/36/355.,
32 param=20.3/21.228/23.228/27.228/129.128/136.128/164.128/165.128/166.128/167.128/
168.128/169.128/178.128/188.128/206.128/208.128/235.128,
33 date=$DATE1/to/$DATE2,
34 target="$TMPDIR/NovE16P1.grib"
35 end
36 **EOF**
```


Anexo IV - Exemplo de *script* para concatenação de ficheiros NetCDF

```
#!/bin/bash
ncks -mk_rec_dmn date ~/NEW/NETCDF/Partes/NovE16P1.nc a1.nc
ncks -mk_rec_dmn date ~/NEW/NETCDF/Partes/NovE16P2.nc a2.nc
ncks -mk_rec_dmn date ~/NEW/NETCDF/Partes/NovE16P3.nc a3.nc
ncks -mk_rec_dmn date ~/NEW/NETCDF/Partes/NovE16P4.nc a4.nc
ncks -mk_rec_dmn date ~/NEW/NETCDF/Partes/NovE16P5.nc a5.nc
for i in 1 2 3 4 5; do
  ncpdq -U a$i.nc b$i.nc
done
ncrcat b*.nc -o c.nc
ncpdq -P all_xst c.nc ../NEW/NETCDF/Novembro16.nc
rm a*.nc b*.nc c.nc
```


Anexo V - Impacto da utilização dos dados de previsão ou medição no cálculo do índice de claridade nas diferenças

Nesta secção apresentam se gráficos com os valores das diferenças horárias, em J/m^2 , entre previsão (calculada com *downscaling* espacial através de interpolação linear dupla) e medição de irradiação solar global em função do índice de claridade calculado com dados de irradiação solar global observados e previstos em Évora e Sines para o período total de dados disponíveis (de 13 de maio de 2015 a 15 de novembro de 2016 para Évora e de 24 de julho de 2015 a 15 de novembro de 2016 para Sines).

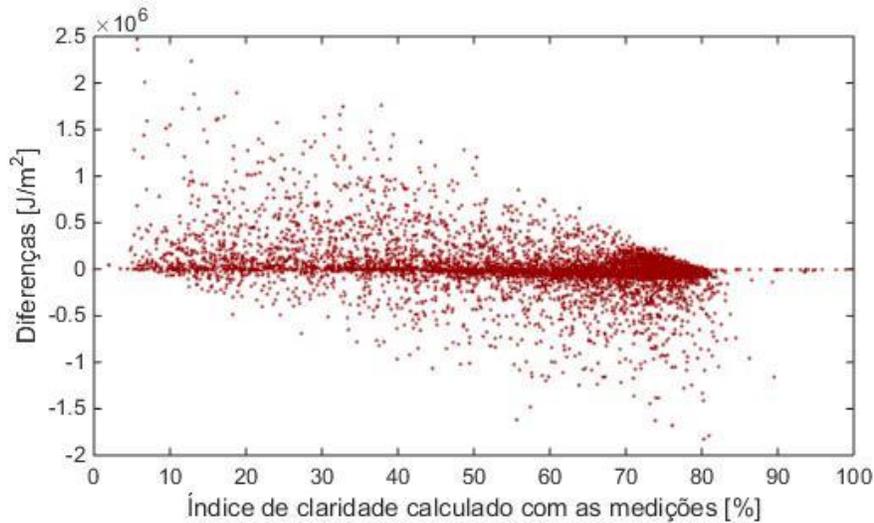


Figura V.1 - Diferenças horárias, em J/m^2 , entre previsões (calculadas com *downscaling* espacial através de interpolação linear dupla) e medições em função do índice de claridade calculados com medições em Évora.

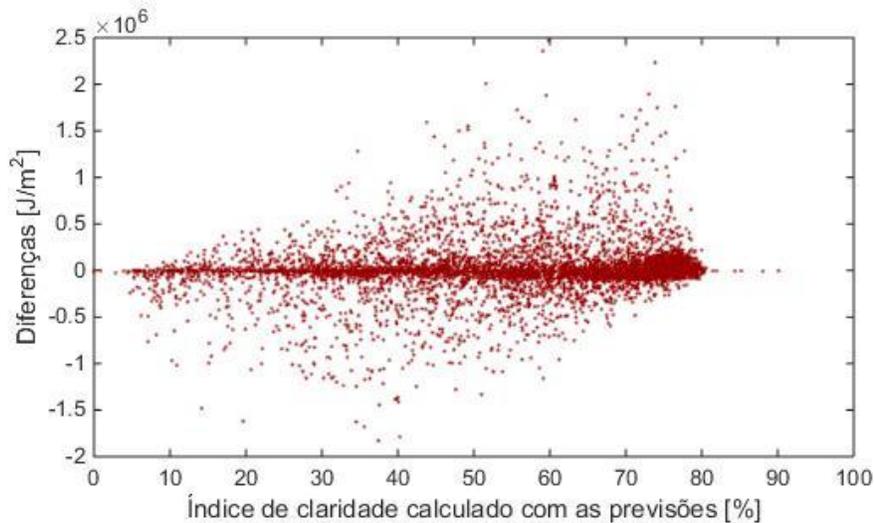


Figura V.2 - Diferenças horárias, em J/m^2 , entre previsões (calculadas com *downscaling* espacial através de interpolação linear dupla) e medições em função do índice de claridade calculado com dados de irradiação solar global previstos em Évora.

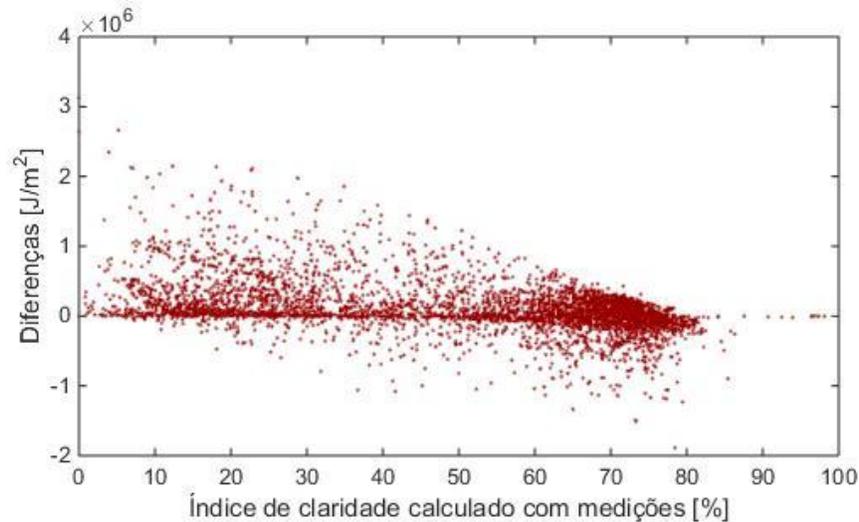


Figura V.3 - Diferenças horárias, em J/m^2 , entre previsões (calculadas com downscaling espacial através de interpolação linear dupla) e medições em função do índice de claridade calculados com medições em Sines.

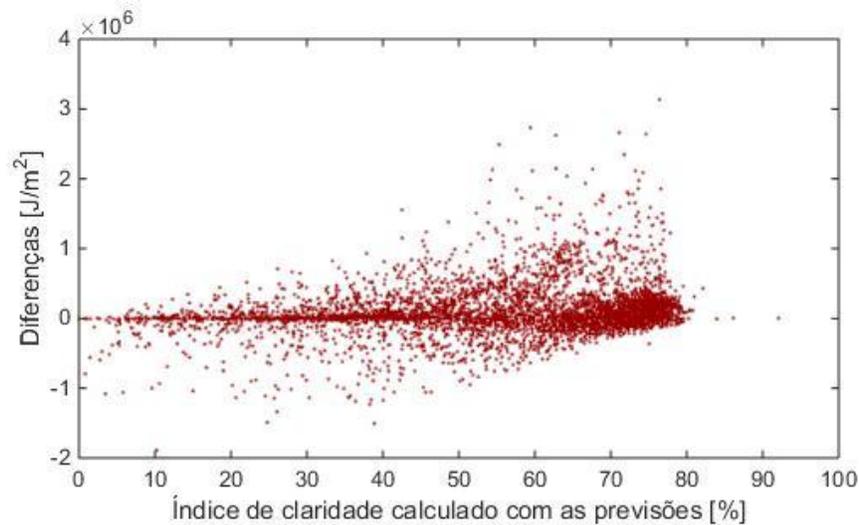


Figura V.4 - Diferenças horárias, em J/m^2 , entre previsões (calculadas com downscaling espacial através de interpolação linear dupla) e medições em função do índice de claridade calculado com dados de irradiação solar global previstos em Sines.

Como se verifica nos gráficos das figuras anteriores, quer para Évora quer para Sines, a forma como as diferenças dependem do índice de claridade depende bastante do valor de irradiação solar global utilizado no seu cálculo. Como referido na Secção 5.3.1, isto deve-se ao facto de valores de diferença entre previsão e medição superiores resultarem em índices de claridade bastante diferentes, quando calculados com essas mesmas previsões e medições (Equação (2.12)). Os pontos correspondentes a estas diferenças elevadas vão assim encontrar-se para valores de índices de claridade distintos caso estes sejam calculados com previsão ou medição dando origem aos gráficos anteriores.

Anexo VI - Análise da dependência das diferenças com variáveis meteorológicas

Nesta secção serão apresentadas as análises da dependência das diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global para Évora e Sines com as variáveis meteorológicas (temperatura média do ar, humidade relativa, intensidade do vento, nebulosidade, altura da base das nuvens, coluna de água, coluna de ozono e visibilidade) que não foram apresentadas na Secção 5.3.

VI.1. Temperatura média do ar

Previamente à análise apresentada na Secção 5.3.4 a dependência das diferenças entre valores horários de irradiação solar global previstos e medidos com os valores horários previstos de temperatura média do ar a 2 metros após o seu *downscaling* espacial através de interpolação linear dupla foi analisada através das Figuras VI.1 e VI.2.

Ao observar estas figuras, verifica-se que existe uma tendência para um valor de diferença horária entre previsão e medição de irradiação solar global superior e positivo para valores de temperatura média do ar a 2 metros também superiores, especialmente no caso de Sines como se observa na Figura VI.2. Isto demonstra que nestes casos a previsão tende a sobrestimar o valor de irradiação solar global.

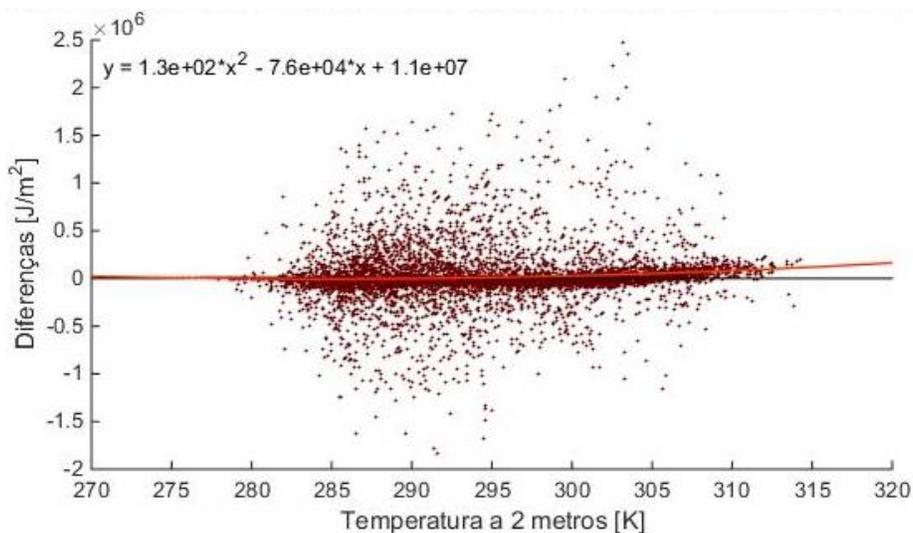


Figura VI.1 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da temperatura a 2m prevista pelo ECMWF para Évora.

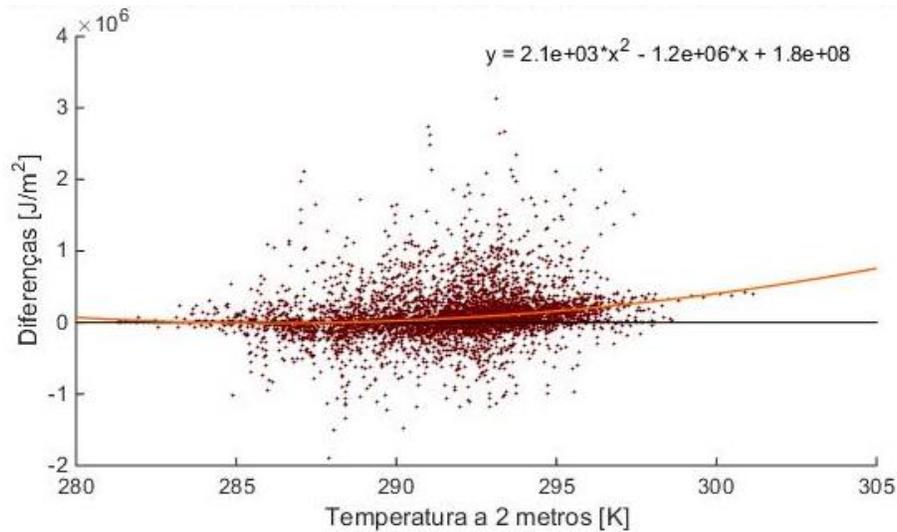


Figura VI.2 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da temperatura a 2m prevista pelo ECMWF para Sines.

VI.2. Humidade relativa do ar

Nesta secção é apresentada a análise inicial da dependência das diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global com a humidade relativa. A previsão desta variável atmosférica foi obtida como referido na Secção 5.3.5 e com estes dados foram criados os gráficos das figuras seguintes que apresentam as diferenças horárias entre previsão e medição, em J/m^2 , em função do valor de humidade relativa.

Nas Figuras VI.3 e VI.4, apenas se verifica, no caso de Évora, que existe uma tendência para valores de diferença entre previsão e medição de irradiação solar global superiores para valores de humidade relativa inferiores a 30% (tendência que não se verifica em Sines). Isto demonstra uma sobrestimação dos valores de irradiação solar global por parte da previsão nestas condições.

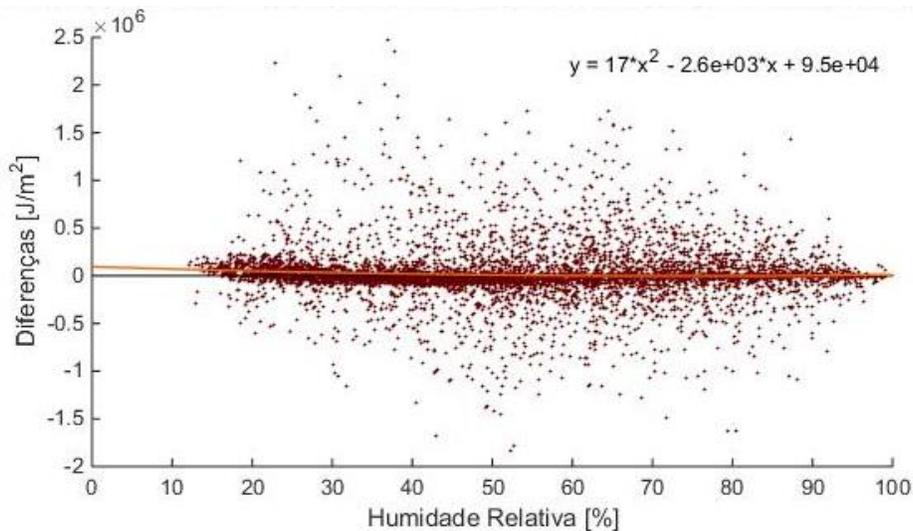


Figura VI.3 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da humidade relativa determinada com as previsões do ECMWF para Évora.

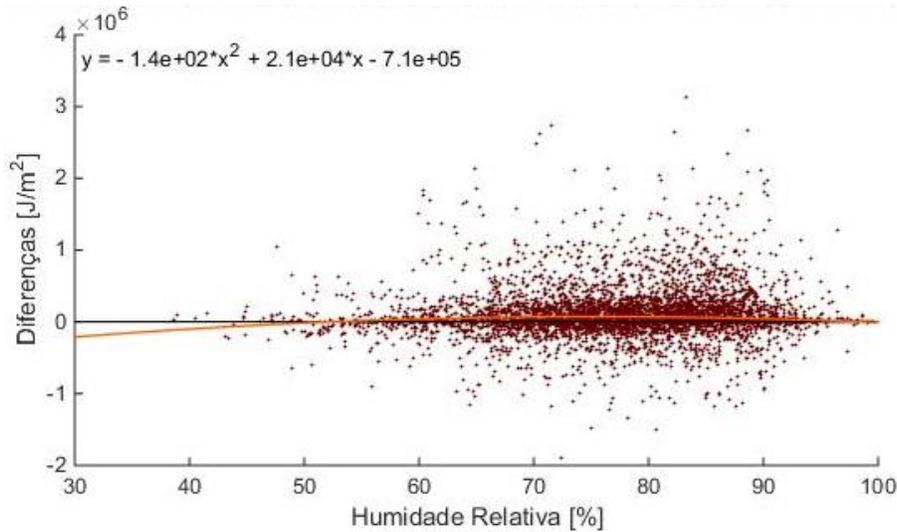


Figura VI.4 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da humidade relativa determinada com as previsões do ECMWF para Sines.

VI.3. Intensidade do vento

A dependência das diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global com a intensidade do vento também foi analisada. Para isso foi necessário aplicar a Equação (3.4) às duas componentes do vento (u e v) fornecidas pelo ECMWF e realizar o *downscaling* espacial através da interpolação linear dupla para o local de medições em Évora e Sines. Neste caso, o *downscaling* da velocidade do vento resulta numa aproximação mais “grosseira”, dado as características do vento dependerem fortemente de efeitos locais induzidos pela orografia, cobertura do terreno ou a existência de obstáculos. Com estes dados foram criados os gráficos das Figuras VI.5 e VI.6 que apresentam as diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global, em J/m^2 , em função da intensidade do vento.

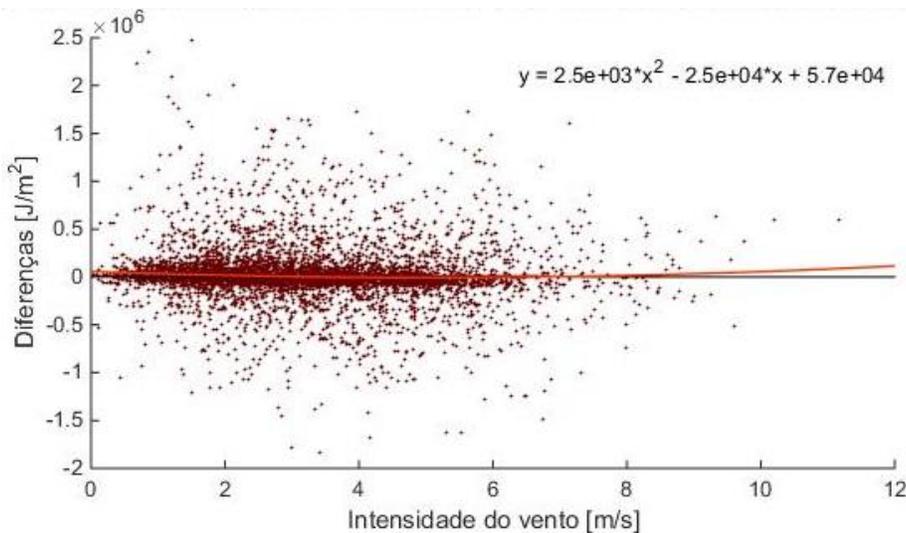


Figura VI.5 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da intensidade do vento determinada com as previsões do ECMWF para Évora.

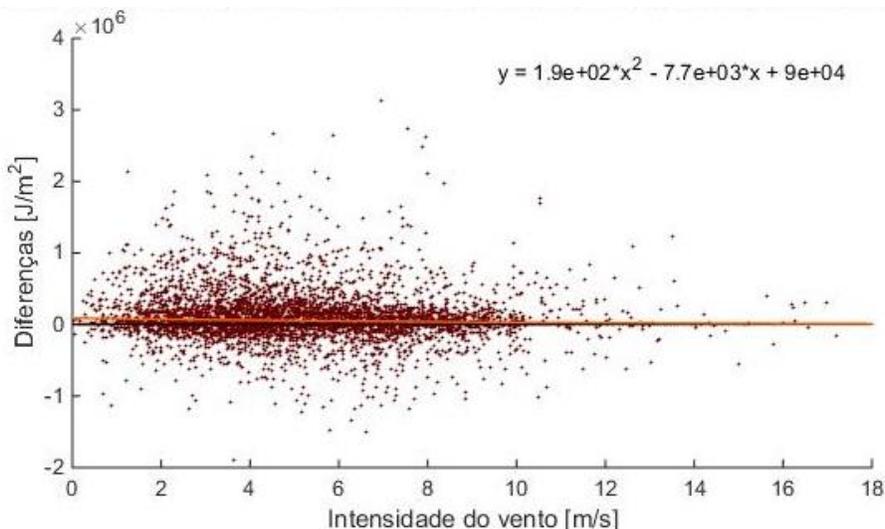


Figura VI.6 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da intensidade do vento determinada com as previsões do ECMWF para Sines.

Os gráficos das figuras anteriores não mostram uma relação entre as diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global e as previsões da intensidade do vento, apenas se verifica que é mais frequente a existência de ventos com intensidade entre os 0 e 8 m/s para Évora e os 0 e 10 m/s para Sines podendo chegar aos 17 m/s neste local, para o período de dados analisado.

Foram ainda criadas representações gráficas com a média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global e dos valores de intensidade do vento para cada classe de intensidade do vento.

Tal como nas Figuras VI.5 e VI.6, nas VI.7 e VI.8 não se verifica uma relação entre o valor médio ou o desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global e o valor determinado com as previsões do ECMWF de intensidade do vento.

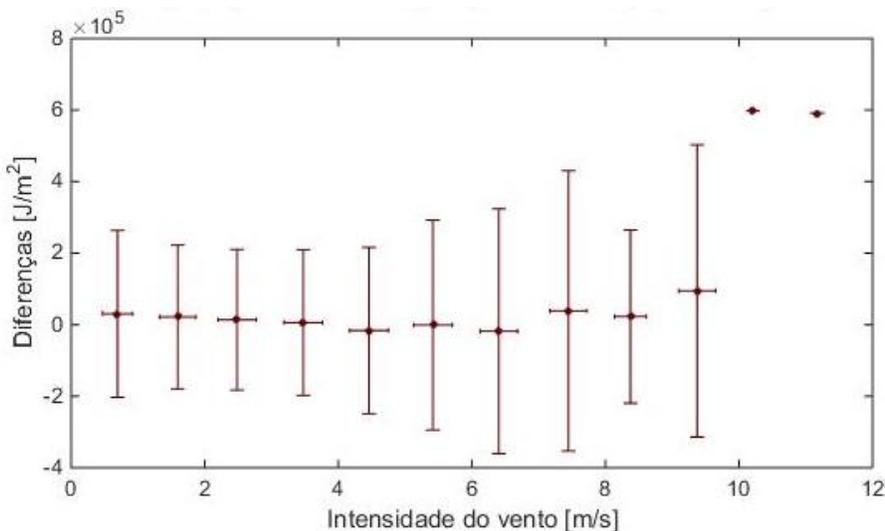


Figura VI.7 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e intensidade do vento em m/s calculada com as previsões do ECMWF para Évora.

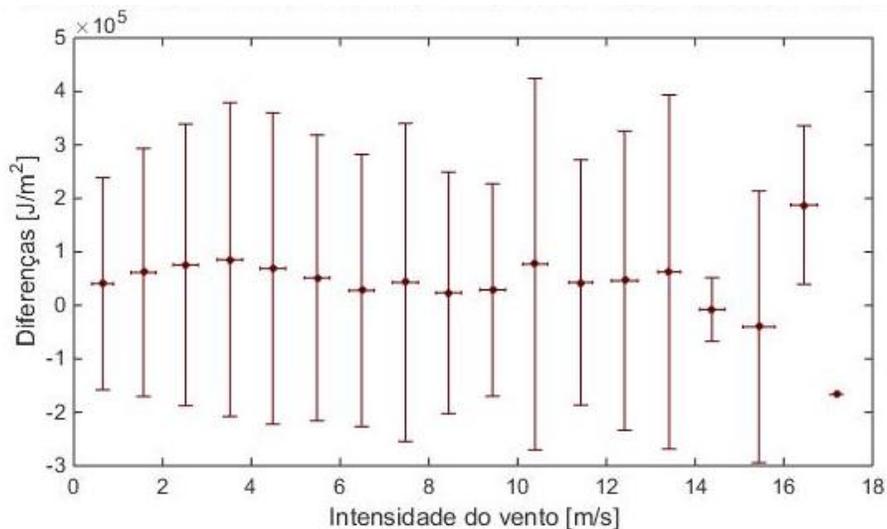


Figura VI.8 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m² e intensidade do vento em m/s calculada com as previsões do ECMWF para Sines.

VI.4. Nebulosidade

A nebulosidade é aqui definida como a percentagem de céu coberto com nuvens com uma gama de valores de 0% para céu limpo a 100% para céu completamente coberto de nuvens determinado para os locais de medição através do *downscaling* espacial por interpolação linear dupla dos valores previstos pelo ECMWF. Com estes dados, foram construídos os gráficos das Figuras VI.9 e VI.10 para Évora e Sines, respetivamente, que mostram as diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em função do valor de nebulosidade previsto.

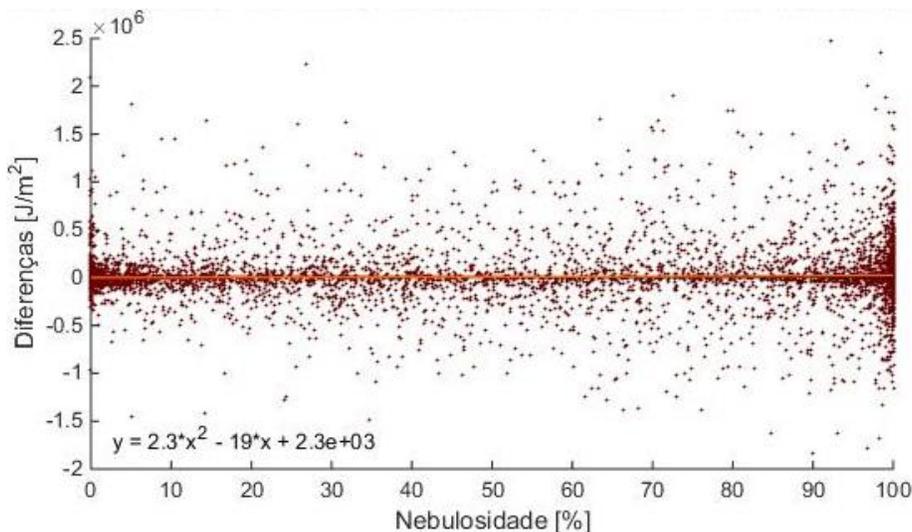


Figura VI.9 – Diferenças horárias em J/m² entre previsão e medição de irradiação solar global em função da nebulosidade prevista para Évora.

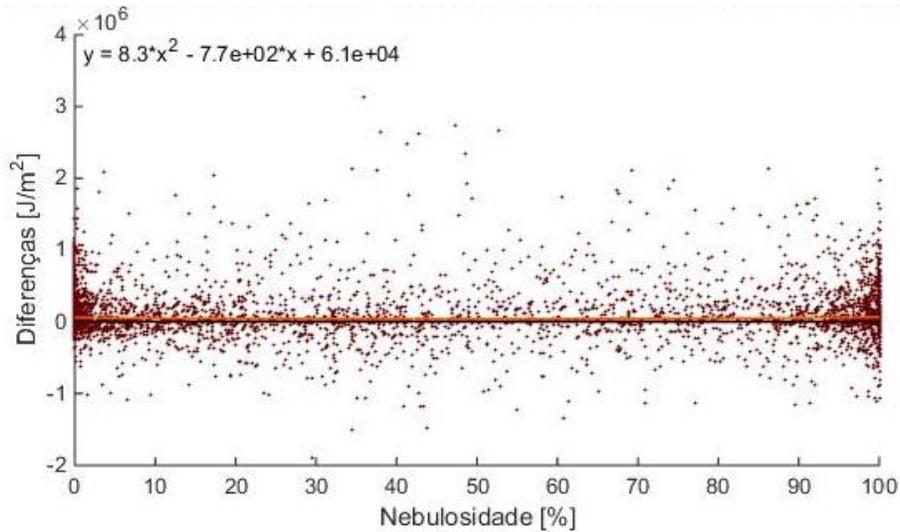


Figura VI.10 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da nebulosidade prevista para Sines.

Ao observar as figuras anteriores, não se verifica uma dependência entre o valor das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global e o valor de nebulosidade previsto. Foi realizada uma análise mais detalhada calculando os valores médios e desvios padrão das diferenças e nebulosidade para cada classe de valores de nebulosidade para Évora e Sines apresentados nos gráficos das Figuras VI.11 e VI.12. Como se verifica nestas figuras, não existe uma relação entre as previsões de nebulosidade do ECMWF e o valor das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global para Évora ou Sines.

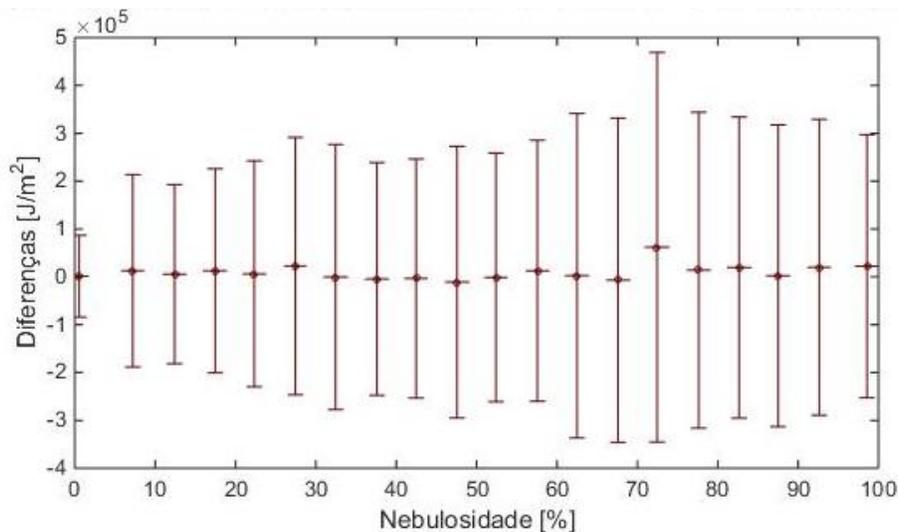


Figura VI.11 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e nebulosidade prevista para Évora.

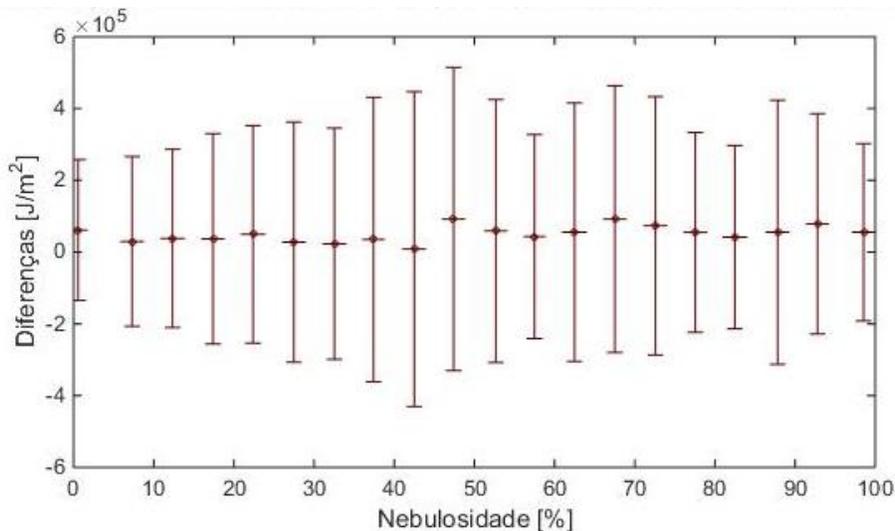


Figura VI.12 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e nebulosidade prevista para Sines.

VI.5. Altura da base das nuvens

Outra variável atmosférica analisada foi a altura da base das nuvens, em metros, prevista pelo ECMWF e determinada para os locais de medição através do *downscaling* espacial por interpolação linear dupla. Os gráficos das Figuras VI.13 e VI.14 foram construídos com o objetivo de verificar se existe uma relação entre esta variável atmosférica e as diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global.

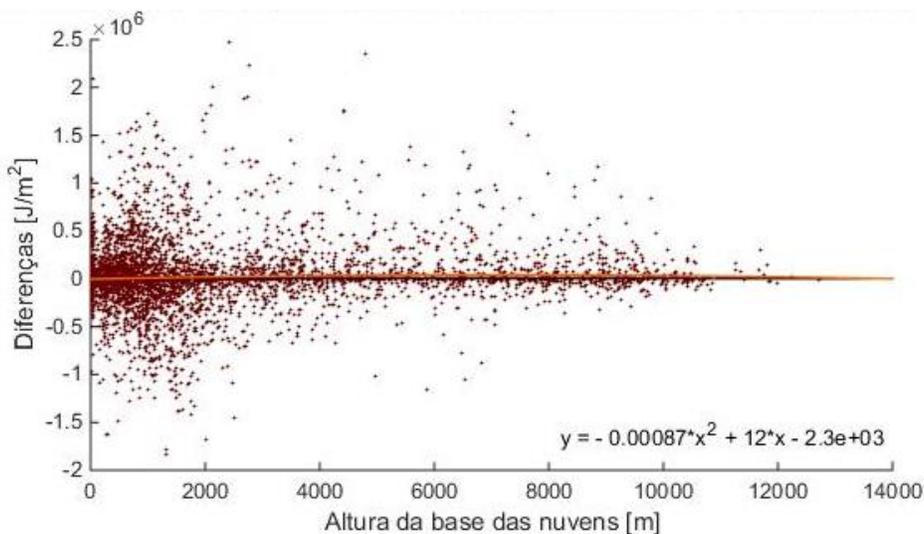


Figura VI.13 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da altura da base das nuvens prevista para Évora.

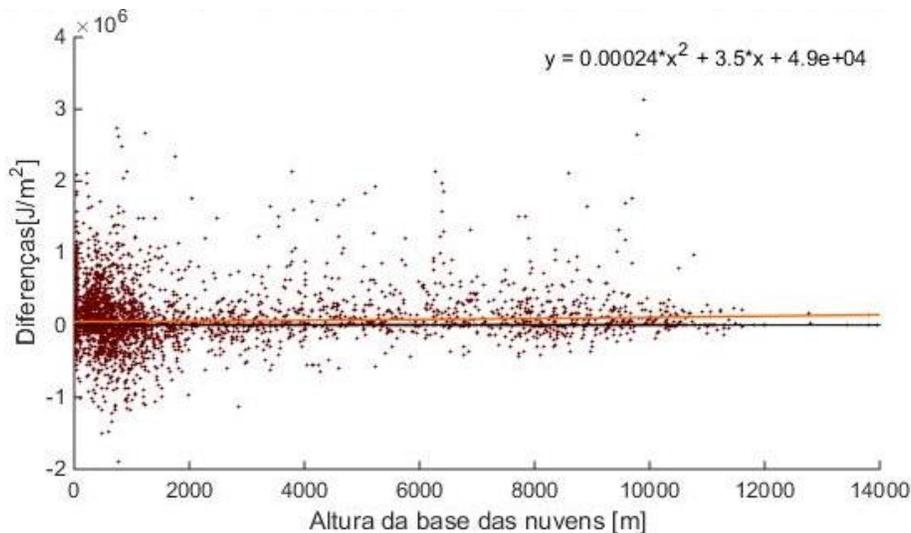


Figura VI.14 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da altura da base das nuvens prevista para Sines.

Ao analisar as figuras anteriores não se verifica uma relação entre o valor das diferenças horárias entre medição e previsão de irradiação solar global e o valor previsto para a altura da base das nuvens quer para Évora quer para Sines. Verifica-se, no entanto, que é mais frequente a existência de nuvens com uma gama de alturas de base de 0 km a 2 km.

Tal como nas análises anteriores, foram criadas representações gráficas da média e do desvio padrão das diferenças e valores previstos de altura da base das nuvens para cada classe de altura da base das nuvens para Évora e Sines.

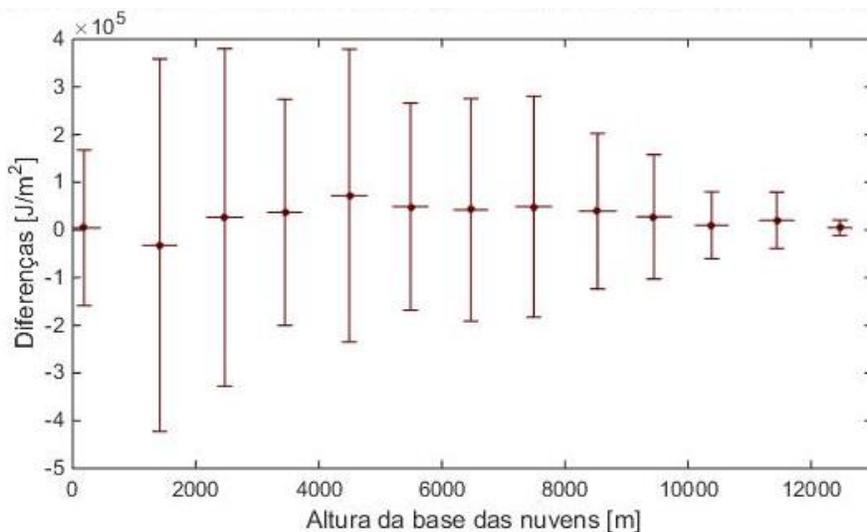


Figura VI.15 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e altura da base das nuvens prevista para Évora.

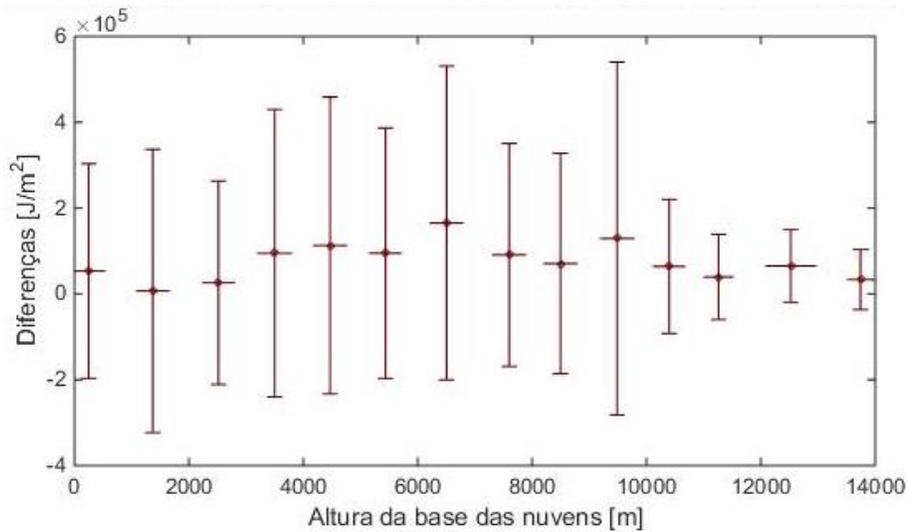


Figura VI.16 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e altura da base das nuvens prevista para Sines.

As Figuras VI.15 e VI.16 não demonstram uma dependência do valor médio ou desvio padrão das diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global com a altura da base das nuvens. Parece existir um menor desvio padrão para valores elevados de altura da base das nuvens, especialmente no caso de Évora, mas isto deve-se principalmente ao facto de existir uma menor densidade de pontos para estas condições.

VI.6. Coluna de água

Nesta secção é apresentada a análise inicial da dependência das diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global com o valor previsto de coluna de água. Foram construídos os gráficos das Figuras VI.17 e VI.18 que mostram as diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em função do valor previsto para a coluna de água para Évora e Sines.

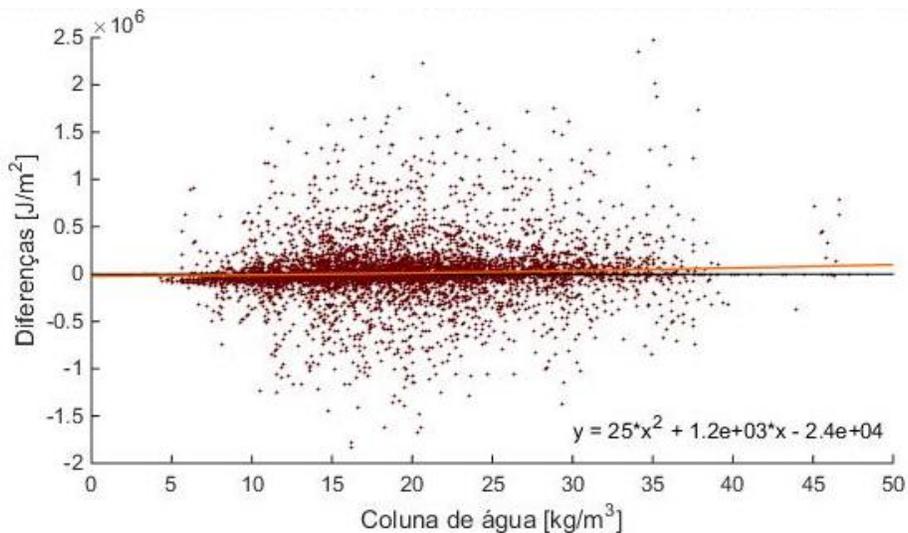


Figura VI.17 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da coluna de água prevista para Évora.

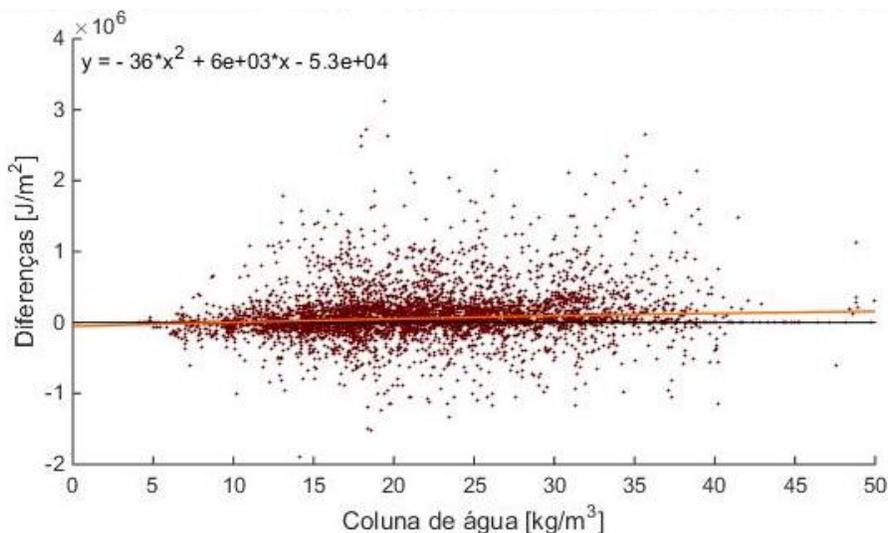


Figura VI.18 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da coluna de água prevista para Sines.

Ao analisar as figuras anteriores verifica-se uma ligeira tendência para valores de diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global superiores e positivos quanto maior for o conteúdo de água na atmosfera quer para Évora quer para Sines significando uma ligeira sobrestimação da irradiação solar global nestas condições.

VI.7. Coluna de ozono

A coluna ou conteúdo de ozono, tal como a coluna ou conteúdo de água, é uma variável meteorológica prevista pelo ECMWF e designa a quantidade de ozono numa coluna vertical da atmosfera. Após o *downscaling* espacial através da interpolação linear dupla desta variável para o local de medições, foram construídos os gráficos das Figuras VI.19 e VI.20 que mostram as diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em função do valor previsto para a coluna de ozono para Évora e Sines.

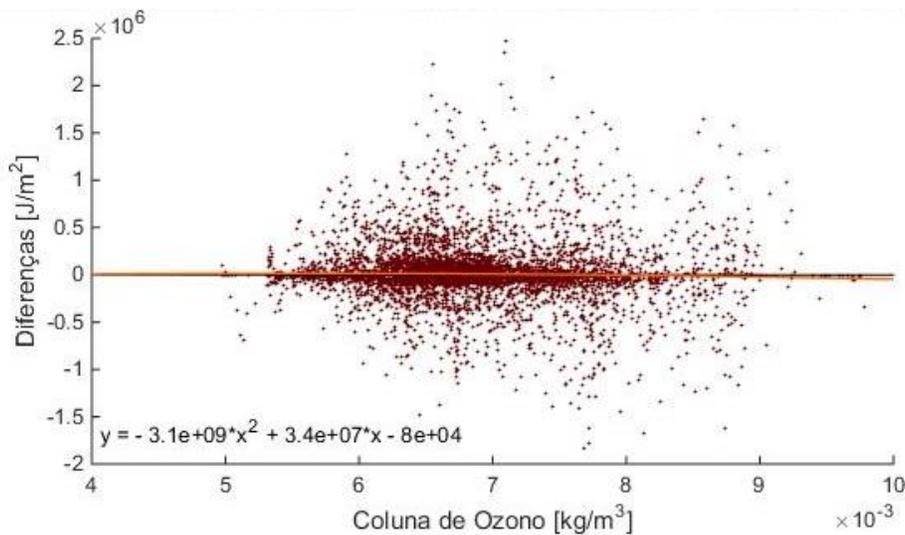


Figura VI.19 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da coluna de ozono prevista para Évora.

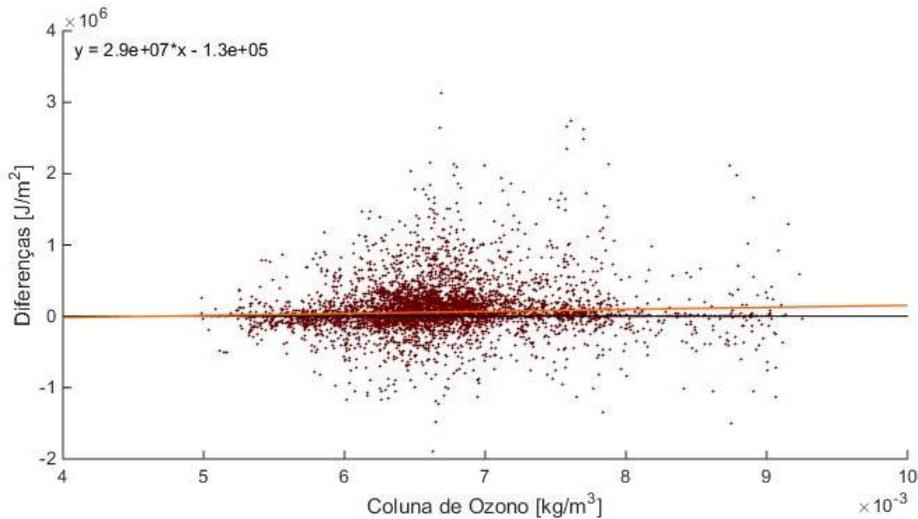


Figura VI.20 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da coluna de ozono prevista para Sines.

Ao analisar as Figuras VI.19 e VI.20 não se verifica uma relação entre o valor das diferenças horárias entre medição e previsão de irradiação solar global e o valor previsto para a coluna de ozono quer para Évora quer para Sines.

Tal como para as análises anteriores, foram criadas as figuras que representam a média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global e valores previstos da coluna de ozono para cada classe de coluna de ozono para Évora e Sines. As Figuras VI.21 e VI.22 não demonstram uma relação entre o valor médio ou desvio padrão das diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global e a coluna de ozono. Parece existir, no entanto, um maior desvio padrão de diferença para valores elevados de coluna de ozono, mas nestas condições também existe uma menor densidade de pontos podendo ser este o motivo.

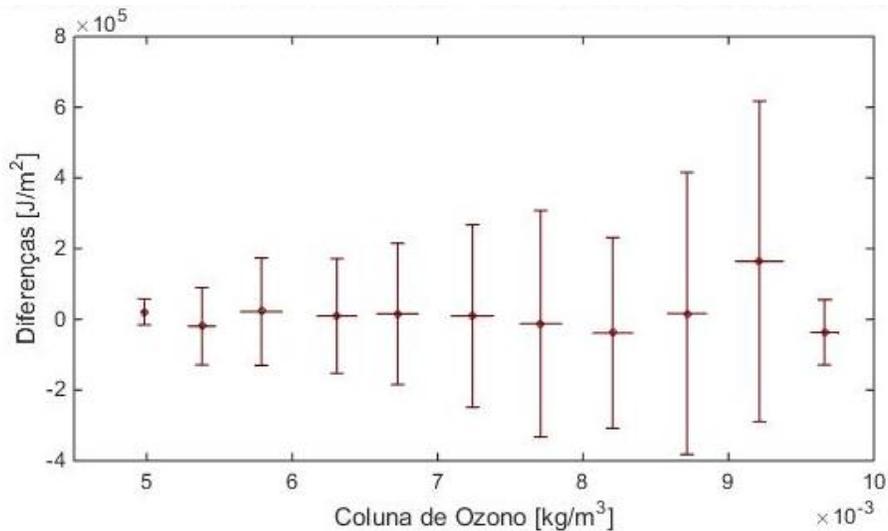


Figura VI.21 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e coluna de ozono prevista para Évora.

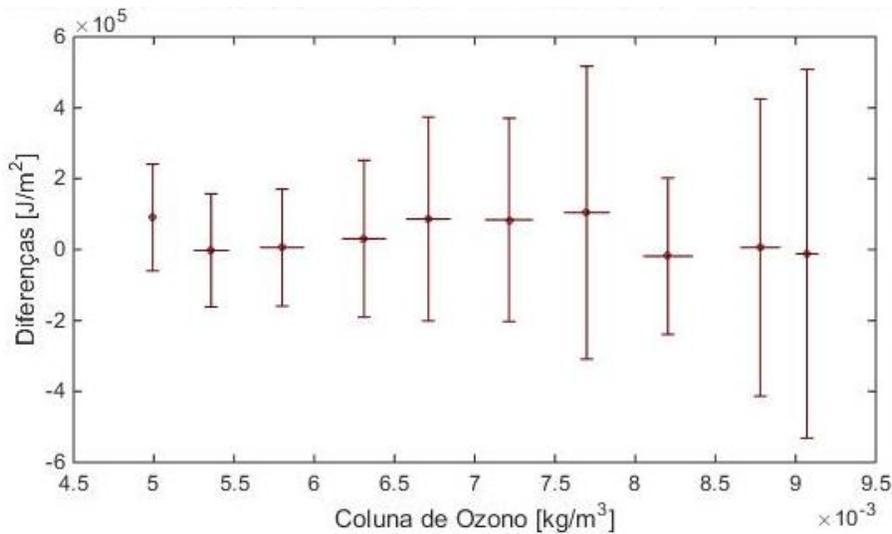


Figura VI.22 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e coluna de ozono prevista para Sines.

VI.8. Visibilidade

A visibilidade é uma medida da distância máxima à qual um objeto pode ser visualizado com clareza. O ECMWF fornece a previsão desta variável atmosférica à qual é posteriormente aplicado o *downscaling* espacial através de interpolação linear dupla. Com estes dados foram construídos os gráficos das Figuras VI.23 e VI.24 que apresentam os valores das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em função da visibilidade.

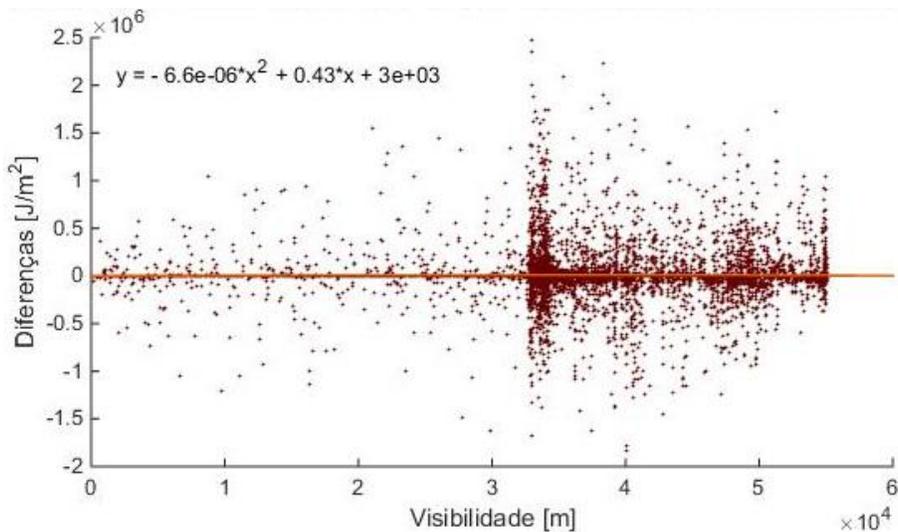


Figura VI.23 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da visibilidade prevista para Évora.

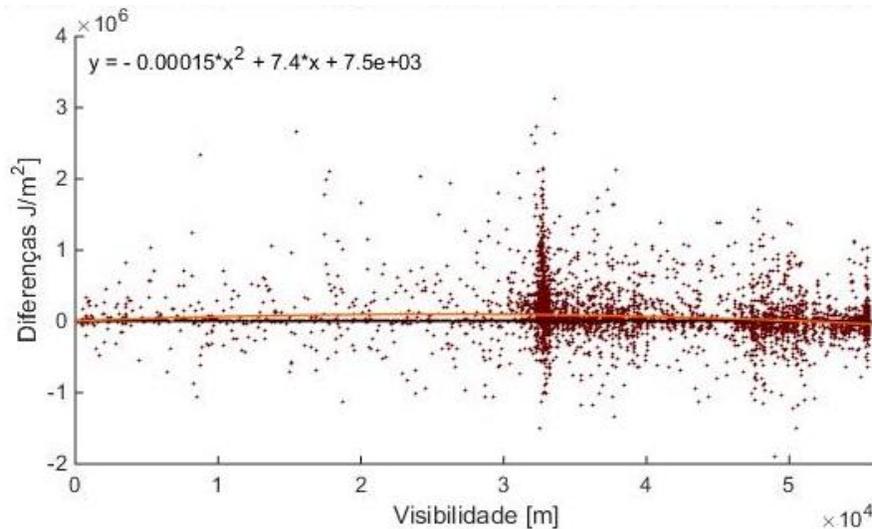


Figura VI.24 – Diferenças horárias em J/m^2 entre previsão e medição de irradiação solar global em função da visibilidade prevista para Sines.

Ao analisar as figuras anteriores não se verifica uma relação entre o valor das diferenças horárias entre medição e previsão de irradiação solar global e o valor previsto de visibilidade quer para Évora quer para Sines. Observa-se, no entanto, que os valores mais frequentes de visibilidade se encontram acima dos 30 km.

Tal como nas análises anteriores, foram criados gráficos que representam a média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global e visibilidade para cada classe de visibilidade para Évora e Sines de forma a realizar uma análise mais pormenorizada.

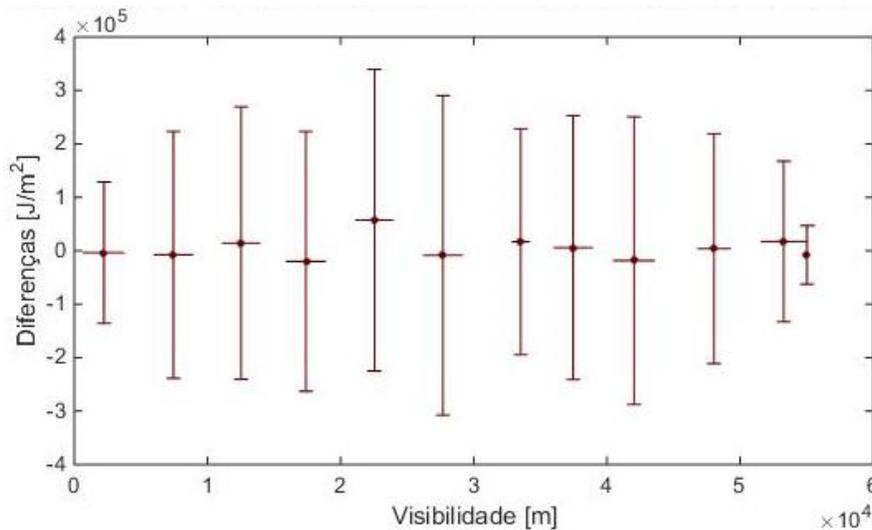


Figura VI.25 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e visibilidade prevista para Évora.

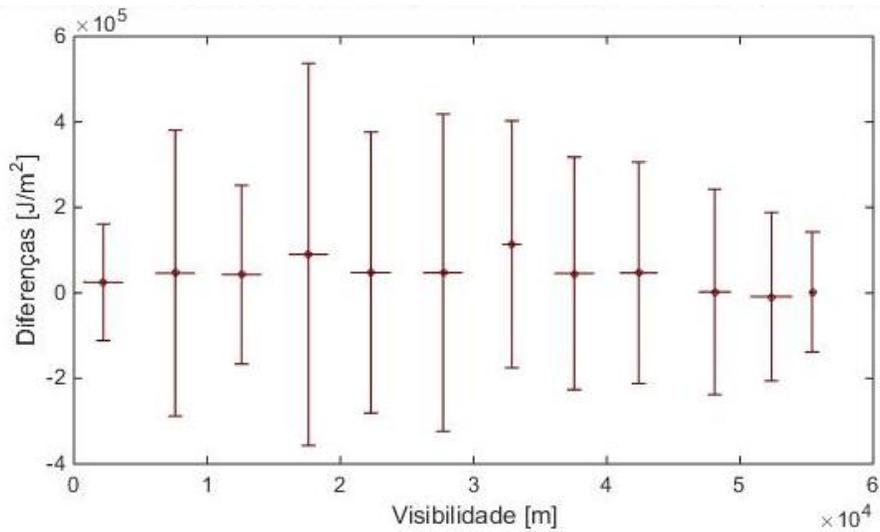


Figura VI.26 – Média e desvio padrão das diferenças horárias entre previsão e medição de irradiação solar global em J/m^2 e visibilidade prevista para Sines.

As Figuras VI.25 e VI.26 não demonstram uma relação explícita entre o valor médio ou desvio padrão das diferenças entre previsão e medição de irradiação solar global e a visibilidade. As variações de desvio padrão das diferenças horárias devem-se principalmente às variações da densidade de pontos para cada classe de visibilidade.

Anexo VII - Código de base em MATLAB utilizado

```
clear
format long

%ÉVORA

%Constants
DM=[0 31 28 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31]; %Number of days in each month
in 2015
DM2=[0 31 29 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31]; %Number of days in each
month in 2016
L=38.567687; %Sensor's Latitude
LO=-7.91704;%Sensor's Longitude
LOM=0; %Meridian's Longitude

for ano=[15 16] %For each year of data
    if ano==15
        mes=[5 6 7 8 9 10 11 12];
    else
        mes=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11];
    end
    [lm,cm]=size(mes);

    for mes=mes(1:cm)%For each month of data
        %Day Selection
        if ano==15 && mes==5
            d=[13:31];
        elseif ano==15 && mes==6 %datalogger
            d=[1:3 5:30];
        elseif ano==15 && mes==7 %datalogger
            d=[1:3 5:30];
        elseif ano==15 && mes==8 %datalogger
            d=[1:9 11:31];
        elseif ano==15 && mes==10 %datalogger
            d=[1:29];
        elseif ano==16 && mes==1 %datalogger
            d=[1:22 24:31];
        elseif ano==16 && mes==2 %datalogger
            d=[1:23 25:29];
        elseif ano==16 && mes==7 %prections+datalogger
            d=[1:9 11:25 27:31];
        elseif ano==16 && mes==10 %datalogger
            d=[1:29];
        elseif ano==16 && mes==11
            d=[1:15];
        elseif mes==4||mes==6||mes==9||mes==11
            d=[1:30];
        else
            d=[1:31];
        end
        [ld,cd]=size(d);

        for dia=d(1:cd)%For each day of data
```



```

R_GBL_Min = dataArray(:, 13);
R_GBL_Std = dataArray(:, 14);
R_DwIR_Avg = dataArray(:, 15);
R_DwIR_Max = dataArray(:, 16);
R_DwIR_Min = dataArray(:, 17);
R_DwIR_Std = dataArray(:, 18);

[Y,M,D,H,MN,S] = datevec(TIMESTAMP1);

%% Clear temporary variables
clearvars filename delimiter startRow formatSpec fileID
dataArray ans;

%Site and Date specifications
N=sum(DM(1:M))+D(1); %Day of the year
alfa=(360/364)*(N-81);
ET=9.87*sind(2*alfa)-7.53*cosd(alfa)-1.5*sind(alfa);%Time
equation
dec=23.45*sind(360/365*(284+N)); %Declination
h=acosd((-sind(dec)*sind(L))/(cosd(dec)*cosd(L)));%Sunset's
hour angle
TSV=h/15;%True solar time
NS=(12-TSV);%Sunrise
PS=(12+TSV);%Sunset
NSR=NS-ET/60-(LOM+LO)/15; %Sunrise in UTC
PSR=(PS)-ET/60-(LOM+LO)/15; %Sunset in UTC
H1=floor(NSR); %Hour before sunrise
H2=ceil(PSR)+1; %Hour after sunset
%Half-hour before sunrise
if (NSR-floor(NSR))>0.5
    H1_=floor(NSR)*2+1;
else
    H1_=floor(NSR)*2;
end
%Half-hour after sunrise
if (PSR-floor(PSR))>0.5
    H2_=ceil(PSR)*2+1;
else
    H2_=ceil(PSR)*2;
end

%Prediction data from ECMWF
if mes<10
    ficheirol=sprintf('C:\\Users\\Sara08\\Desktop\\dados\\ECMW
    F completo\\0%d_%d.nc',mes,ano);
else
    ficheirol=sprintf('C:\\Users\\Sara08\\Desktop\\dados\\ECMW
    F completo\\%d_%d.nc',mes,ano);
end
ncid1=netcdf.open(ficheirol,'NC_NOWRITE');
%Solar global irradiation
ssrd_evora=netcdf.getVar(ncid1,14,[16 35 0
((find(netcdf.getVar(ncid1,3)==date))-1)], [2 2 125 1]);
m=netcdf.getAtt(ncid1,14,'scale_factor');
b=netcdf.getAtt(ncid1,14,'add_offset');
ssrd_evora=int64(ssrd_evora);

```

```

ssrd_evora2=ssrd_evora*m+b;
ssrd_final(:, :, 1)=ssrd_evora2(:, :, 1);
%Non-accumulated data for the nearest 4 points to the
observation site
for i=2:125
    for p=1:2
        for q=1:2
            ssrd_final(p,q,i)=ssrd_evora2(p,q,i)-
                ssrd_evora2(p,q,i-1);
        end
    end
end
end
%Hourly predictions for the first day
Rad_ECMWF=double(ssrd_final(:, :, 2:25));
for i=1:24
    if i<=H1
        Rad_ECMWF(:, :, i)=0;
    end
    if i>=H2
        Rad_ECMWF(:, :, i)=0;
    end
end
end
% Half-hourly predictions: Temporal Downscaling
x1=NSR-floor(NSR);
x2=PSR-floor(PSR);
ssrd_final=double(ssrd_final);
for i=1:24
    for p=1:2
        for q=1:2
            Prev30(p,q,i)=0.5*ssrd_final(p,q,i+1)*(1-
                1/4*((ssrd_final(p,q,i+2)-ssrd_final(p,q,i+1))/
                    (ssrd_final(p,q,i+2)+ssrd_final(p,q,i+1))+(ssrd_fi
                    nal(p,q,i+1)-ssrd_final(p,q,i))/
                    (ssrd_final(p,q,i+1)+ssrd_final(p,q,i)))));
            Prev60(p,q,i)=0.5*ssrd_final(p,q,i+1)*(1+1/4*((ssr
                d_final(p,q,i+2)-ssrd_final(p,q,i+1))/
                    (ssrd_final(p,q,i+2)+ssrd_final(p,q,i+1))+(ssrd_fi
                    nal(p,q,i+1)-ssrd_final(p,q,i))/
                    (ssrd_final(p,q,i+1)+ssrd_final(p,q,i)))));
            if x1>0.5
                Prev60(p,q,H1+1)=ssrd_final(p,q,H1+2);
                Prev30(p,q,H1+1)=0;
            else
                Prev30(p,q,H1+1)=(0.5-x1)^2/(1-
                    x1)^2*ssrd_final(p,q,H1+2);
                Prev60(p,q,H1+1)=((1.5-2*x1)/(2*((1-
                    x1)^2)))*ssrd_final(p,q,H1+2);
            end
        end
        if x2<=0.5
            Prev30(p,q,H2-1)=ssrd_final(p,q,H2);
            Prev60(p,q,H2-1)=0;
        else
            Prev30(p,q,H2-1)=(x2-
                0.25)/(x2^2)*ssrd_final(p,q,H2);
            Prev60(p,q,H2-1)=((x2-
                0.5)^2)/(x2^2)*ssrd_final(p,q,H2);
        end
    end
end
end

```

```

        end
    end
end
Prev(:, :, 1:2:48)=Prev30;
Prev(:, :, 2:2:48)=Prev60;
Prev(isnan(Prev))=0;
for i=1:48
    if i<=H1_
        Prev(:, :, i)=0;
    end
    if i>=H2_
        Prev(:, :, i)=0;
    end
end
end
%Hourly spatial downscaling:
PNW(1, :)=Rad_ECMWF(1, 1, :); %Norwest point
PSW(1, :)=Rad_ECMWF(1, 2, :); %Southwest point
PNE(1, :)=Rad_ECMWF(2, 1, :); %Northeast point
PSE(1, :)=Rad_ECMWF(2, 2, :); %Southeast point
%Interpolation
PW=PNW-(38.6250-38.567684)*(PNW-PSW)/(38.6250-38.5000);
PE=PNE-(38.6250-38.567684)*(PNE-PSE)/(38.6250-38.5000);
Interpolacao=PE-(7.875-7.911704)*(PE-PW)/(7.875-8.000);
%Average
Media=(PNW+PSW+PNE+PSE)/4;
%Half-hourly spatial downscaling:
NW(1, :)=Prev(1, 1, :); %Norwest point
SW(1, :)=Prev(1, 2, :); %Southwest point
NE(1, :)=Prev(2, 1, :); %Northeast point
SE(1, :)=Prev(2, 2, :); %Southeast point
%Interpolation
W=NW-(38.6250-38.567684)*(NW-SW)/(38.6250-38.5000);
E=NE-(38.6250-38.567684)*(NE-SE)/(38.6250-38.5000);
Interpolacao_=E-(7.875-7.911704)*(E-W)/(7.875-8.000);
%Average
Media_=(NW+SW+NE+SE)/4;

%Obsrevation data treatment
%Missing values
minuto=[];%Existing data counter
RadCorr=[];%corrected GHI vector
[MNl, MNc]=size(MN);
%Existing data counter definition
if MN(1)==1
    for i=1:MNl
        minuto=[minuto MN(i)+60*H(i)];
    end
else
    for i=1:MNl
        minuto=[minuto MN(i)+1+60*H(i)];
    end
end
%Missing data in the beginning of the day
if minuto(1)~=1
    continue;
end
%Placement of data in the corrected GHI vector

```

```

[lmin,cmin]=size(minuto);
for i=1:cmin
    RadCorr(minuto(i))=R_GBL_Avg(i);
end
%Missing data at the end of the day
if MN(1)==1
    if minuto(cmin)~=1439
        continue;
    end
else
    if minuto(cmin)~=1440
        continue;
    end
end
%Missing data in between measurements
for x=1:cmin-1
    if minuto(x+1)-minuto(x)>20
        continue;
    elseif minuto(x+1)-minuto(x)>1
        for z=minuto(x)+1:minuto(x+1)-1
            RadCorr(z)=(z-minuto(x))/(minuto(x+1)-
                minuto(x))*(RadCorr(minuto(x+1))-
                RadCorr(minuto(x)))+RadCorr(minuto(x));
        end
    end
end
%Measurement hourly integration
for p=0:23
    Sensor(p+1)=0;
    if p==23
        for i=1:59
            Sensor(p+1)=(Sensor(p+1)+RadCorr(i+p*60)*60);
        end
    else
        for i=1:60
            Sensor(p+1)=(Sensor(p+1)+RadCorr(i+p*60)*60);
        end
    end
end
%Measurement half-hourly integration
for p=0:23
    Sensor_3(p+1)=0;%First half-hours vector
    Sensor_6(p+1)=0;%Secound half-hours vector
    for i=1:30
        Sensor_3(p+1)=(Sensor_3(p+1)+RadCorr(i+p*60)*60);
    end
    if p==23
        for i=31:59
            Sensor_6(p+1)=(Sensor_6(p+1)+RadCorr(i+p*60)*60);
        end
    else
        for i=31:60
            Sensor_6(p+1)=(Sensor_6(p+1)+RadCorr(i+p*60)*60);
        end
    end
end
end
Sensor_(1:2:48)=Sensor_3;

```

```

Sensor_(2:2:48)=Sensor_6;
%Zero-Offset hourly correction
Sensor_Offset=[];
for i=1:24
    Sensor_Offset(i)=Sensor(i)-(Sensor(H1)-((H1-i)/((H1-
H2)/(Sensor(H1)-Sensor(H2)))));
    if i<=H1
        Sensor_Offset(i)=0;
    end
    if i>=H2
        Sensor_Offset(i)=0;
    end
end
%Zero-Offset half-hourly correction
Sensor_Offset_=[];
for i=1:48
    Sensor_Offset_(i)=Sensor_(i)-(Sensor_(H1_)-((H1_-
i)/((H1_-H2_)/(Sensor_(H1_)-Sensor_(H2_)))));
    if i<=H1_
        Sensor_Offset_(i)=0;
    end
    if i>=H2_
        Sensor_Offset_(i)=0;
    end
end
end

%Hourly and Half-hourly Solar Zenith Angle and Clearness Index
for k=1:24
    AST2(k)=k+ET/60+(LOM+LO)/15;
    AST1(k)=k-1+ET/60+(LOM+LO)/15;
    angH(k)=((AST2(k)-AST1(k))/2+AST1(k))-12)*15;%Hour angle
    zenite(k)=acosd(sind(L)*sind(dec)+cosd(L)*cosd(dec)*cosd(a
ngH(k)));%Solar Zenith Angle
    if k==H1+1
        EXTRA(k)=12.0*3600.0*1366.1*(1.0+0.033*cosd(360.0*N/3
65.0))/pi*(sind(dec)*sind(L)*(AST2(k)-
NS)*(pi/12.0)+cosd(dec)*cosd(L)*(sin((pi/12.0)*NS)-
sin((pi/12.0)*AST2(k))));%Radiation on top of the
        atmosphere
    elseif k==H2-1
        EXTRA(k)=12.0*3600.0*1366.1*(1.0+0.033*cosd(360.0*N/3
65.0))/pi*(sind(dec)*sind(L)*(PS-
AST1(k))*(pi/12.0)+cosd(dec)*cosd(L)*(sin((pi/12.0)*A
ST1(k))-sin((pi/12.0)*PS)));%Radiation on top of the
        atmosphere
    else
        EXTRA(k)=12.0*3600.0*1366.1*(1.0+0.033*cosd(360.0*N/3
65.0))/pi*(sind(dec)*sind(L)*(AST2(k)-
AST1(k))*(pi/12.0)+cosd(dec)*cosd(L)*(sin((pi/12.0)*A
ST1(k))-sin((pi/12.0)*AST2(k))));%Radiation on top of
        the atmosphere
    end
    K(k)=Sensor_Offset(k)/EXTRA(k)*100;%Clearness index
    determined with measurement data of GHI
    K1(k)=Interpolacao(k)/EXTRA(k)*100;%Clearness index
    determined with prediction data of GHI
end
end

```

```

%Half-Hourly values
Hora_=[0.5:0.5:24];
for k=1:48
    AST2(k)=Hora_(k)+ET/60+(LOM+LO)/15;
    AST1(k)=Hora_(k)-0.5+ET/60+(LOM+LO)/15;
    angH(k)=((AST2(k)-AST1(k))/2+AST1(k))-12)*15;%Ângulo
    horário
    zenite_(k)=acosd(sind(L)*sind(dec)+cosd(L)*cosd(dec)*cosd(
    angH(k)));%Ângulo Solar Zenital
    if k==H1_+1
        EXTRA_(k)=12.0*3600.0*1366.1*(1.0+0.033*cosd(360.0*N/
        365.0))/pi*(sind(dec)*sind(L)*(AST2(k)-
        NS)*(pi/12.0)+cosd(dec)*cosd(L)*(sin((pi/12.0)*NS)-
        sin((pi/12.0)*AST2(k))));%Radiação no topo da
        atmosfera
    elseif k==H2_-1
        EXTRA_(k)=12.0*3600.0*1366.1*(1.0+0.033*cosd(360.0*N/
        365.0))/pi*(sind(dec)*sind(L)*(PS-
        AST1(k))*(pi/12.0)+cosd(dec)*cosd(L)*(sin((pi/12.0)*A
        ST1(k))-sin((pi/12.0)*PS)));%Radiação no topo da
        atmosfera
    else
        EXTRA_(k)=12.0*3600.0*1366.1*(1.0+0.033*cosd(360.0*N/
        365.0))/pi*(sind(dec)*sind(L)*(AST2(k)-
        AST1(k))*(pi/12.0)+cosd(dec)*cosd(L)*(sin((pi/12.0)*A
        ST1(k))-sin((pi/12.0)*AST2(k))));%Radiação no topo da
        atmosfera
    end
    K_(k)=Sensor_Offset_(k)/EXTRA_(k)*100;%Índice de
    claridade calculado com medições
    K1_(k)=double(Interpolacao_(k))/EXTRA_(k)*100;%Índice de
    claridade calculado com previsões
end
for k=1:H1
    zenite(k)=0;
end
for k=H2:24
    zenite(k)=0;
end
for k=1:H1_
    zenite_(k)=0;
end
for k=H2_:48
    zenite_(k)=0;
end

```

%Relative differences between predictions and measurements

```

%Hourly differences
D_NE=[];
D_SE=[];
D_NW=[];
D_SW=[];
D_interpolacao=[];
D_media=[];
for k=1:24
    D_NE(k)=(double(PNE(k))-Sensor_Offset(k))/
    Sensor_Offset(k)*100;

```

```

    D_SE(k)=(double(PSE(k))-Sensor_Offset(k))/
    Sensor_Offset(k)*100;
    D_NW(k)=(double(PNW(k))-Sensor_Offset(k))/
    Sensor_Offset(k)*100;
    D_SW(k)=(double(PSW(k))-Sensor_Offset(k))/
    Sensor_Offset(k)*100;
    D_interpolacao(k)=(double(Interpolacao(k))-
    Sensor_Offset(k))/Sensor_Offset(k)*100;
    D_media(k)=(double(Media(k))-Sensor_Offset(k))/
    Sensor_Offset(k)*100;
end
%Half-Hourly differences
D_NE_=[];
D_SE_=[];
D_NW_=[];
D_SW_=[];
D_interpolacao_=[];
D_media_=[];
for k=1:48
    D_NE_(k)=(double(NE(k))-Sensor_Offset_(k))/
    Sensor_Offset_(k)*100;
    D_SE_(k)=(double(SE(k))-Sensor_Offset_(k))/
    Sensor_Offset_(k)*100;
    D_NW_(k)=(double(NW(k))-Sensor_Offset_(k))/
    Sensor_Offset_(k)*100;
    D_SW_(k)=(double(SW(k))-Sensor_Offset_(k))/
    Sensor_Offset_(k)*100;
    D_interpolacao_(k)=(double(Interpolacao_(k))-
    Sensor_Offset_(k))/Sensor_Offset_(k)*100;
    D_media_(k)=(double(Media_(k))-
    Sensor_Offset_(k))/Sensor_Offset_(k)*100;
end
end
end
end

```


Anexo VIII - Exemplo de ficheiro de saída do algoritmo

EVORA PT 3856769 -791704 290
ECMWF 2016 5 1 0
0 0 132 273 0
0 0 127 213 0
0 0 125 130 0
0 0 122 280 0
0 0 119 368 0
0 0 117 268 0
0 0 115 8 0
0 0 114 466 0
0 0 114 1069 0
0 0 114 954 0
0 0 114 1161 0
23185 2102 117 2123 0
149813 362 124 2266 0
302609 811 132 1452 0
491720 554 141 707 0
696341 281 149 133 0
876276 359 157 239 0
1064181 220 166 331 0
1227169 196 174 254 0
1381261 153 182 91 0
1506361 158 190 109 0
1614598 72 197 66 0
1694579 14 203 14 0
1749841 8 208 95 0
1775134 16 212 102 0
1773534 3 215 64 0
1745838 33 217 17 0
1686173 57 219 121 0
1600899 81 219 44 0
1486698 164 220 113 0
1354077 239 220 145 0
1197150 314 219 143 0
1035126 352 217 117 0
847011 545 214 200 0
666395 577 209 302 0
465613 975 202 459 0
281670 1340 190 886 0
136381 1143 181 1030 0
15272 4882 173 881 0
0 0 166 770 0

0 0 163 743 0
0 0 158 678 0
0 0 154 662 0
0 0 150 674 0
0 0 146 711 0
0 0 143 735 0
0 0 140 719 0
0 0 138 720 0