



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Avaliação da qualidade das previsões de radiação solar global e direta para a região de Évora, efetuadas operacionalmente pelos modelos numéricos de previsão do tempo

João Luís Parreira Rocha Homem

Orientação | Professor Doutor Rui Salgado

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Évora, 2018



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Avaliação da qualidade das previsões de radiação solar global e direta para a região de Évora, efetuadas operacionalmente pelos modelos numéricos de previsão do tempo

João Luís Parreira Rocha Homem

Orientação | Professor Doutor Rui Salgado

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Évora, 2018

Agradecimentos

Quero agradecer primeiramente aos meus pais, Pedro Homem e Paulina Parreira, e ao meu irmão, Pedro Homem, por todo o apoio, confiança e auxílio ao longo do meu percurso académico e terem tornado esta jornada possível.

Agradecer ao meu orientador o Professor Doutor Rui Paulo Vasco Salgado por todo o apoio, paciência e compreensão ao longo da elaboração deste trabalho, por estar sempre disponível para orientar-me e pelos seus conhecimentos transmitidos.

Não posso deixar de agradecer à Patrícia Demétrio, por todas as palavras de força e de incentivo ao longo deste trabalho e durante a minha vida académica.

A todos os meus amigos que fizeram parte da vida minha académica, quero agradecer-los pela estima, pelos valores e conhecimentos partilhados.

Agradecer à ALOP, visto que este trabalho insere-se nos objetivos dos projetos ALOP (ALentejo Observation and Prediction systems, ALT20-03-0145-FEDER-000004) e DNI-A (Medição e avaliação da radiação solar direta no Alentejo, ALT20-03-0145-FEDER-000011).

Resumo

Nas últimas décadas, tem-se assistido ao aperfeiçoamento da previsão numérica do tempo, que hoje em Portugal está disponível para 72 horas a uma resolução de 2,5 km, através do modelo do do Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (ECMWF). Também é certo que só muito recentemente se tem passado a utilizar os modelos meteorológicos para a previsão de radiação solar direta.

Neste sentido, o objetivo do presente trabalho é comparar as previsões de radiação solar fornecidas pelo modelo ECMWF, desenvolvido pelo IFS e que corre operacionalmente, numa base bi-diária, com observações efetuadas na região de Évora. Para o efeito serão trabalhados e utilizados dados de radiação solar global, direta e difusa, registados nos equipamentos pertencentes ao Instituto de Ciências da Terra ou a redes em que este se integra. Para o efeito serão utilizados correspondentes a um ano completo, de modo a poder efetuar uma análise sazonal. A qualidade das previsões será avaliada estatisticamente e ir-se-á distinguir a fiabilidade da previsão a 1, 2 ou 3 dias.

Palavras-chave: Energia solar, Radiação solar global, Radiação solar direta, Modelos de previsão do tempo, ECMWF

Abstract

Evaluation of the quality of forecasts of global and direct solar radiation for the region of Évora, carried out operationally by numerical models of weather forecasting

In the last decades, we have been improving the numerical weather forecast, which in Portugal is now available for 72 hours at a resolution of 2.5 km, using the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) model. It is also true that only very recently has past to use meteorological models for the forecasting of solar radiation.

In this sense, the objective of the present work is to compare the predictions of solar radiation provided by the IFS model, developed by the ECMWF and operational, on a bi-daily basis, with observations made in Region of Évora. For that purpose, data will be processed and used of global solar radiation, direct and diffuse, recorded in the equipment belonging to the Institute of Earth Sciences or to the networks in which it is integrated. For this purpose they will be used corresponding to a full year in order to be able to carry out a seasonal analysis. The quality of the forecasts will be evaluated statistically and the reliability of the forecast will be distinguished at 1, 2 or 3 days.

Keywords: Solar energy, Global solar radiation, Direct solar radiation, Weather models, ECMWF

Índice

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Nomenclatura	xvi
1. Introdução	1
2. Introdução à Energia Solar	3
2.1. Energia Solar.....	6
2.1.1 Relação Terra - Sol.....	6
2.1.2 Declinação Solar.....	7
2.1.3 Hora solar aparente	8
2.1.4 Equação do Tempo.....	9
2.1.5 Ângulo solar horário (h)	10
2.1.6 Ângulo da altitude solar (α)	10
2.1.7 Ângulo solar azimutal (z)	11
2.1.8 Ângulo de nascer e pôr-do-sol (hss).....	12
2.1.9 Ângulo de incidência (Θ).....	12
2.2 Radiação solar direta, difusa e global.....	13
2.3 Radiação Direta Normal (DNI).....	16
2.4. Instrumentos de medição de radiação solar.....	17
2.4.1 Piranómetro	17
2.4.2 Pireliómetro.....	19
2.5. Propriedades atmosféricas que afetam a radiação solar.....	21
2.6. Radiação em dias de céu limpo	26
3. Estado da arte da previsão da radiação solar	30
3.1 Previsão numérica do tempo	31
3.2 Modelos de PNT	34
3.3 Previsão da radiação solar	36

3.4	Centro Europeu de Previsão do Tempo de Médio Prazo (ECMWF)	39
3.5	Modelo de radiação do ECMWF	40
4.	Recolha e tratamento de dados	42
4.1	Dados ECMWF	42
4.2	Dados observados no Colégio Luís António Verney	45
5.	Comparação das observações com as previsões	47
5.1.	Metodologia	47
5.1.1	Erro relativo em percentagem (E)	47
5.1.2	Tendência do erro médio (MBE)	47
5.1.3	Erro percentual absoluto médio (MAPE)	48
5.1.4	Raiz quadrada do erro médio (RMSE)	48
5.1.5	Coeficiente de correlação	48
5.2.	Gráficos do DNI para os três dias de previsão	50
5.2.1	Abril	50
5.2.2	Maio	52
5.2.3	Junho	54
5.2.4	Julho	56
5.2.5	Agosto	59
5.2.6	Setembro	61
5.2.7	Outubro	63
5.2.8	Novembro	65
5.2.9	Dezembro	67
5.2.10	Janeiro	69
5.2.11	Fevereiro	71
5.2.12	Março	73
5.3.	Métricas estatísticas para os três dias de previsão	75
5.3.1	Previsão de DNI a 24 horas	75

5.3.2	Previsão de DNI a 48 horas	76
5.3.3	Previsão de DNI a 72 horas	78
5.1.	Métricas estatísticas anuais para os três dias de previsão.....	81
5.4.1	Correlação	81
5.4.2	MAPE.....	82
5.4.3	MBE	83
5.4.4	RMSE	84
6.	Conclusão	85
7.	Referências.....	87

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Evolução da constante solar desde o ano de 1610 até ao ano de 2014 .	3
Figura 2.2 - Tipos de radiação incidente na Terra	5
Figura 2.3 - Relação Sol-Terra.	6
Figura 2.4 - Órbita descrita pela Terra em torno do Sol	7
Figura 2.5 - Declinação solar com respetivos equinócios e solstícios	7
Figura 2.6 - Variação da declinação solar ao longo do ano.....	8
Figura 2.7 - Curva de correção do tempo ao longo do ano	9
Figura 2.8 - Definição de latitude (L), ângulo horário (h) e da declinação solar (δ)..	10
Figura 2.9 - Variação da altura solar	11
Figura 2.10 - Percurso do sol ao longo do dia desde o nascer a pôr-do-sol	12
Figura 2.11 - Ângulos solares.....	13
Figura 2.12 - Componentes da radiação solar.....	14
Figura 2.13 – Dados das componentes da radiação solar num dia limpo	15
Figura 2.14 - Efeito ótico das nuvens na lente do piranómetro.....	15
Figura 2.15 - Piranómetro CM6B da <i>Kipp & Zonen</i>	18
Figura 2.16 - Típico piranómetro.	18
Figura 2.17 - Anel e bola de sombreamento da <i>Kipp & Zonen</i>	19
Figura 2.18 - Típica construção de um piranómetro	19
Figura 2.19 - Seguidor solar SOLYS2 da <i>Kipp & Zonen</i>	20
Figura 2.20 - Série temporal das componentes da radiação solar para condições de céu limpo e com períodos com nuvens medidos por um pireliómetro (A = DNI) e piranómetro (B = GHI; C = DHI) e as correspondentes imagens do céu durante o dia 19 julho de 2012 no Colorado.....	21
Figura 2.21 - Medições a partir de telescópicos circum-solares na Califórnia e Geórgia e o campo de visão de um piranómetro	22
Figura 2.22 - Imagem de um dia com concentração baixa de aerossóis com condições de profundidade ótica de (≈ 0.1) no Colorado.	23
Figura 2.23 - Imagem de um dia com alta concentração de aerossóis (≈ 0.5) em Riyadh, Arábia Saudita.....	23
Figura 2.24 - Distribuição espectral da radiação solar acima da atmosfera (extraterrestre) e à superfície da terra depois da absorção pelos gases atmosféricos (nível do mar), e radiação do corpo negro a uma temperatura de 5520 K	24

Figura 2.25 - Dependência da massa de ar na posição relativa em relação a um observador.....	24
Figura 2.26 - Espectro solar padrão elaborado pela American Society of Testing and Materials (ASTM).....	25
Figura 2.27 - Elementos do processo da previsão da radiação solar para necessidades operacionais elétricas	26
Figura 2.28 - Mapa global mostrando a média de ADO 670 no ano de 2009, calculado pelo Monitoring Atmospheric Composition and Climate (MACC), a base de dados foi desenvolvida pelo ECMWF. A cor da escala varia entre 0.02-0.60	27
Figura 2.29 - Mapa global mostrando a média anual de água precipitável em 2009, calculado pelo NOAA/NCEP Climate Forecast System Reanalysis . As unidades são em kg/m ²	28
Figura 2.30 - Comparação do impacto no DNI num dia de céu limpo com situações em que ocorre o dobro de aod, o dobro de vapor de água, o dobro do ozono, o dobro da massa de ar e uma redução da altura do solo em 50%, tendo como caso base uma massa de ar de 1.5, 1100m altura, AOD = 0.03, vapor de água = 0.75cm, e ozono = 320 du	29
Figura 3.1 - A fábrica de previsão meteorológica que Richardson sonhava (Impressão artística de F. Schuiten, 2000).....	33
Figura 3.2 - Modelo de classificação baseado na resolução espacial e temporal	35
Figura 3.3 - Contribuição da energia solar e do vento para o total de energia fornecida na Alemanha para 26.5-3.6.2012	37
Figura 3.4 - Visão geral das etapas básicas na modelação da previsão de energia fotovoltaica	37
Figura 4.1 - Esquema da energia radiativa de pequeno comprimento de onda e de longo comprimento de onda que flui na atmosfera. Os fluxos ascendentes e descendentes no topo da atmosfera e na superfície	44
Figura 4.2 - Radiação solar direta total à superfície (FDIR) nas primeiras 24 horas do início da previsão em 15-02-2015 (W/m ²).	45
Figura 4.3 - Localização da estação meteorológica do Instituto de Ciências da Terra da Universidade de Évora	46
Figura 5.1 - Ciclo diário médio do DNI para o mês de abril	50

Figura 5.2 - Nebulosidade, aerossóis e vapor de água presentes na atmosfera para a região de Évora no mês de abril de 2016	51
Figura 5.3 - Scatter plot do dni medido vs previsto para o mês de abril	52
Figura 5.4 - Ciclo diário médio do DNI para o mês de maio	52
Figura 5.5 - Nebulosidade, aerossóis e vapor de água presentes na atmosfera para a região de Évora no mês de maio de 2016, figura semelhante à Figura 5.2 mas respeitante ao mês de maio.	53
Figura 5.6 - Scatter plot do dni medido vs previsto para o mês de maio	54
Figura 5.7 - Ciclo diário médio do DNI para o mês de junho	54
Figura 5.8 - Nebulosidade, aerossóis e vapor de água presentes na atmosfera para a região de Évora no mês de junho de 2016, figura semelhante à Figura 5.2 mas respeitante ao mês de junho.	55
Figura 5.9 - Scatter plot do dni medido vs previsto para o mês de junho	56
Figura 5.10 - Ciclo diário médio do DNI para o mês de julho	56
Figura 5.11 - Nebulosidade, aerossóis e vapor de água presentes na atmosfera para a região de Évora no mês de julho de 2016, figura semelhante à Figura 5.2 mas respeitante ao mês de julho.....	57
Figura 5.12 - Scatter plot do dni medido vs previsto para o mês de julho	58
Figura 5.13 - Ciclo diário médio do DNI para o mês de agosto	59
Figura 5.14 - Nebulosidade, aerossóis e vapor de água presentes na atmosfera para a região de Évora no mês de agosto de 2016, figura semelhante à Figura 5.2 mas respeitante ao mês de agosto.	60
Figura 5.15 - Scatter plot do dni medido vs previsto para o mês de agosto	60
Figura 5.16 - Ciclo diário médio do DNI para o mês de setembro	61
Figura 5.17 - Nebulosidade, aerossóis e vapor de água presentes na atmosfera para a região de Évora no mês de setembro de 2016, figura semelhante à Figura 5.2 mas respeitante ao mês de setembro.	62
Figura 5.18 - Scatter plot do dni medido vs previsto para o mês de setembro	62
Figura 5.19 - Ciclo diário médio do DNI para o mês de outubro.....	63
Figura 5.20 - Nebulosidade, aerossóis e vapor de água presentes na atmosfera para a região de Évora no mês de outubro de 2016, figura semelhante à Figura 5.2 mas respeitante ao mês de outubro.	64
Figura 5.21 - Scatter plot do dni medido vs previsto para o mês de outubro.....	64

Figura 5.22 - Ciclo diário médio do DNI para o mês de novembro	65
Figura 5.23 - Nebulosidade, aerossóis e vapor de água presentes na atmosfera para a região de Évora no mês de novembro de 2016, figura semelhante à Figura 5.2 mas respeitante ao mês de Novembro.....	66
Figura 5.24 - <i>Scatter plot</i> do dni medido vs previsto para o mês de novembro	66
Figura 5.25 - Ciclo diário médio do DNI para o mês de dezembro	67
Figura 5.26 - Nebulosidade, aerossóis e vapor de água presentes na atmosfera para a região de Évora no mês de dezembro de 2016, figura semelhante à Figura 5.2 mas respeitante ao mês de dezembro.	68
Figura 5.27 - <i>Scatter plot</i> do dni medido vs previsto para o mês de dezembro	68
Figura 5.28 - Ciclo diário médio do DNI para o mês de janeiro	69
Figura 5.29 - Nebulosidade, aerossóis e vapor de água presentes na atmosfera para a região de Évora no mês de janeiro de 2017, figura semelhante à Figura 5.2 mas respeitante ao mês de janeiro.	70
Figura 5.30 - <i>Scatter plot</i> do dni medido vs previsto para o mês de janeiro	70
Figura 5.31 - Ciclo diário médio do DNI para o mês de fevereiro	71
Figura 5.32 - Nebulosidade, aerossóis e vapor de água presentes na atmosfera para a região de Évora no mês de fevereiro de 2017, figura semelhante à Figura 5.2 mas respeitante ao mês de fevereiro.	72
Figura 5.33 - <i>Scatter plot</i> do dni medido vs previsto para o mês de fevereiro	72
Figura 5.34 - Ciclo diário médio do DNI para o mês de março	73
Figura 5.35 - Nebulosidade, aerossóis e vapor de água presentes na atmosfera para a região de Évora no mês de março de 2017, figura semelhante à Figura 5.2 mas respeitante ao mês de março.	74
Figura 5.36 - <i>Scatter plot</i> do dni medido vs previsto para o mês de março	74
Figura 5.37 – Correlação anual	81
Figura 5.38 – MAPE anual.....	82
Figura 5.39 - MBE anual.....	83
Figura 5.40 - RMSE anual	84

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Consumo energético mundial, 2012-2040	4
Tabela 2 – Características dos dados do ECMWF recolhidos.....	43
Tabela 3 - Características do local de medição da radiação solar no ICT.....	45
Tabela 4 - Interpretação do coeficiente de correlação.....	49
Tabela 5 - Testes estatísticos para cada mês para a previsão a 24 horas de DNI..	75
Tabela 6 - Testes estatísticos para a previsão a 48 horas	77
Tabela 7 - Testes estatísticos para a previsão a 72 horas	78

Nomenclatura

Símbolos	Descrição	Unidades
AST	Hora solar aparente	Horas
$A_{\text{superfície terrestre}}$	Área da superfície terrestre	m^2
DHI	Radiação difusa horizontal	W/m^2
DNI	Radiação direta normal	W/m^2
DS	Acerto horário	Horas
E	Erro relativo em percentagem	%
E_{solar}	Energia total proveniente do sol durante um ano	EJ
ET	Equação do tempo	Minutos
GHI	Radiação global horizontal	W/m^2
h	Ângulo horário	°
h_{ss}	Ângulo de nascer e pôr do sol	°
L	Longitude local	°
LST	Hora local <i>standard</i>	Horas
MBE	Tendência do erro médio	-
MPE	Erro médio em percentagem	-
N	Dia do ano	Dias
RMSE	Raiz quadrada do erro médio	-
S	Constante solar	W/m^2
SL	Longitude <i>standard</i>	°
SSRE	Soma do quadrado do erro relativo	-
T_{ano}	Duração do dum ano em segundos	s
T_{dia}	Duração do dia em segundos	s

z	Ângulo solar azimutal	°
Z_s	Ângulo de azimute da superfície	°
sza	Ângulo solar zenital	°

Letras gregas

α	Altitude solar	°
β	Ângulo de inclinação da superfície em relação à horizontal	°
δ	Declinação solar	°
θ	Ângulo de incidência	°

Siglas e Acrónimos

AROME	<i>Application of Research to Operations at Mesoscale</i>
CGE	Centro de Geofísica de Évora
CNRS	<i>Centre National de Recherches Météorologiques</i>
CPV	Concentração de energia solar fotovoltaica
CSP	Concentração de energia solar térmica
DNI	Radiação solar direta normal incidente
ECMWF	<i>European Centre for Median-Range Weather Forecasts</i>
ENIAC	<i>Electronic Numerical Integrator and Computer</i>
FDIR	<i>Direct Solar Radiation on Surface</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
ICT	Instituto Ciências e da Terra
IFS	<i>Integrated Forecast System</i>

IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
Météo-France	<i>Meteorological Service of France</i>
NetCDF	<i>Network Common Data Form</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OLR	<i>Outgoing Long-Wave Radiation</i>
PNT	Previsão numérica do tempo
SSRD	<i>Surface Solar Radiation Downwards</i>
TOA	<i>Top of Atmosphere</i>
UE	Universidade de Évora

1. Introdução

Atualmente, a nossa economia tem uma elevada dependência de fontes de energia fósseis que exercem um impacto que é prejudicial ao equilíbrio ecológico do planeta Terra.

O preço do petróleo, carvão e o gás natural não param de subir à medida que as suas reservas diminuem a cada dia que passa. O nosso país utiliza imensos recursos na importação de energia, o que pode representar que esse capital não seja investido noutras áreas muito mais benéficas para o país.

As energias renováveis são sem dúvida uma alternativa a este problema, uma vez que o nosso país possui energia solar, eólica, biomassa e das ondas em abundância. É ainda preciso ter em conta que da utilização de equipamentos de energias alternativas, apenas advêm custos da sua manutenção, instalação e compra.

A região do Alentejo é privilegiada pela alta disponibilidade de radiação solar [1,2], nomeadamente a zona interior, que tem um elevado potencial de energia solar direta, que é a componente da radiação importante para as tecnologias de concentração solar.

Nos dias de hoje a energia solar já é mais barata do que o carvão em alguns países como é o caso do Chile e dos Emirados Árabes Unidos e a sua tendência é de vir a descer cada vez mais ao longo dos anos. Desde 2009 os preços da energia solar desceram cerca de 60%, beneficiando os empréstimos bancários e aumentando a capacidade de produção nas fábricas para níveis recordes [3].

Com esta tendência a vir ocorrer com uma elevada probabilidade, o conhecimento da previsão da radiação solar global, difusa e direta na região é essencial para promover o aproveitamento da energia solar térmica, térmica e fotovoltaica, com recurso a tecnologias de concentração e também para caracterização e avaliação do recurso solar para o dimensionamento, financiamento e instalação de centrais com tecnologias de concentração solar de pequena, média e grande dimensões.

Inicialmente, estava previsto que o estudo incidisse na previsão de radiação solar direta num plano inclinado (DNI) efetuadas através do modelo de previsão numérica do tempo de área limitada e alta resolução, o AROME, que foi desenvolvido pela

Météo-France e que corre operacionalmente no Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA). A parceria seria realizada entre a Universidade de Évora e o IPMA. No entanto, apesar de a radiação solar à superfície ser prevista diariamente pelo AROME, as variáveis não são atualmente arquivadas não sendo assim possível obter uma série de dados suficientemente longa para realizar o presente trabalho.

Tendo em conta o sucedido a solução encontrada foi utilizar os dados fornecidos pelo modelo de previsão de radiação solar do Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (ECMWF), centro de previsão do tempo em que Portugal participa e que é atualmente a ferramenta numérica de previsão mais utilizada em Portugal pelos meteorologistas e que é o modelo global de previsão do tempo que apresenta os melhores indicadores de previsão [4].

O presente trabalho tem assim como objetivo avaliar a qualidade das previsões de radiação solar à superfície fornecidas pelo modelo operacional de previsão numérica desenvolvido pelo ECMWF, com observações efetuadas na região de Évora. Neste sentido as previsões do ECMWF são comparadas com os dados de radiação solar direta, registados nos equipamentos de medição pertencentes ao Instituto de Ciências da Terra.

Com os dados obtidos a qualidade das previsões será avaliada estatisticamente e ir-se-á distinguir a fiabilidade da previsão a um, dois e três dias.

2. Introdução à Energia Solar

A quase totalidade da radiação eletromagnética que atinge o planeta Terra é proveniente do Sol. A natureza e a intensidade da radiação emitida pelo dependem da sua temperatura. A radiação que chega à Terra é emitida essencialmente numa camada superficial do Sol, designada por fotosfera, cuja a temperatura é da ordem dos 6000 K.

A observação rigorosa da radiação emitida pelo Sol tem que ser efetuada no exterior da atmosfera por satélites, visto que a radiação que chega à superfície da Terra é filtrada através das várias camadas da atmosfera. Assim o valor da radiação no topo da atmosfera de acordo com medições já estabelecidas é próxima de 1366 W/m^2 e é designada de constante solar (S). A constante solar é a potência da radiação solar incidente num plano perpendicular à direção desta radiação, quando a terra está à distância média do Sol. Ao longo dos séculos esta sofreu alterações no seu valor e é possível ver a sua evolução desde 1610 até aos dias de hoje através da Figura 2.1.

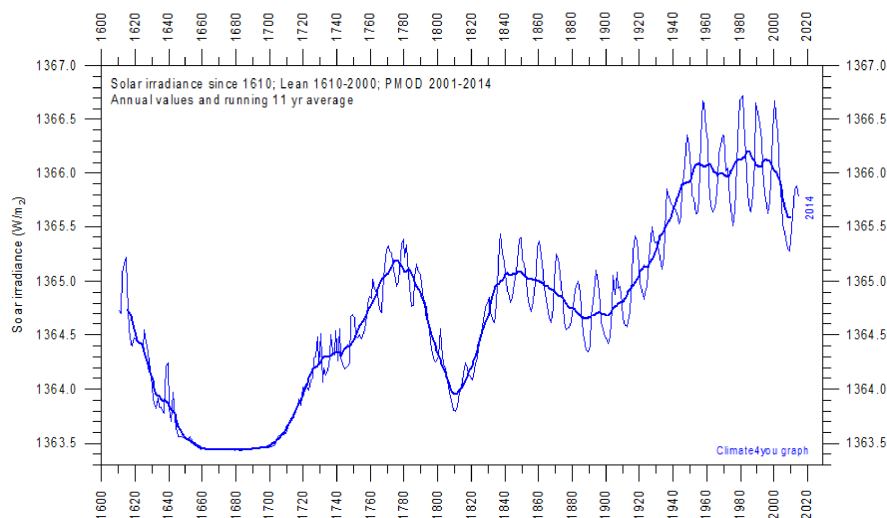


FIGURA 2.1 - EVOLUÇÃO DA CONSTANTE SOLAR DESDE O ANO DE 1610 ATÉ AO ANO DE 2014, [5].

Através da constante solar é possível calcular a energia total proveniente do sol que atinge a Terra anualmente que é dada pela seguinte Equação (2.1) [6]:

$$E_{\text{solar anual}} = S \times A_{\text{superfície terrestre}} \times T_{\text{ano}} \quad (2.1)$$

Onde

$$A_{\text{superfície terrestre}} = \pi \times (6365 \times 10^3)^2 = 1,27 \times 10^{14} \text{ m}^2 \quad (2.1a)$$

$$T_{\text{ano}} = 86400 \times 365,25 = 31557600 \text{ s} \quad (2.1b)$$

$$S = 1366 \text{ W/m}^2 \quad (2.1c)$$

O tempo que a Terra leva para completar a sua translação em torno do Sol corresponde a aproximadamente 365,25 dias, com cada dia a durar cerca de 864000 segundos.

Efetuada a Equação (2.1) verifica-se que a energia total proveniente do sol e que atinge a Terra por um ano é de $5,49 \times 10^{24} \text{ J}$ [6].

No ano de 2012, o consumo mundial de energia foi de 549 Exajoules (EJ) (ver Tabela 1). Pelo valor obtido na equação da energia total que chega ao planeta Terra, cerca de 5490000 EJ, é possível afirmar que o consumo de energia mundial corresponde a, aproximadamente, 0,01% da radiação solar recebida. Assim a energia solar se tivesse um aproveitamento mundial de 0,01%, seria suficiente para satisfazer os gastos energéticos mundiais anualmente.

TABELA 1 – CONSUMO ENERGÉTICO MUNDIAL, 2012-2040, ADAPTADO DE [7].

Ano	Consumo mundial (EJ)
2012	549
2020	629
2025	674
2030	718
2035	766
2040	815

Com a variação dos preços dos combustíveis fósseis, devido à sua progressiva escassez a nível mundial e das constantes modificações no ambiente com as

alterações climáticas em destaque, a utilização de energia solar será uma das fontes de energia mais predominantes no futuro próximo. A energia solar é uma energia não poluidora e com grande disponibilidade em Portugal, entre 2200 a 3000 horas anuais, tornando assim um dos recursos energéticos renováveis com mais relevo.

Devido aos fenómenos de reflexão, dispersão e de absorção através das nuvens e partículas suspensas no ar que ocorre ao longo da atmosfera, nem toda a energia que chega ao planeta Terra pode ser aproveitada (ver Figura 2.2). Aproximadamente 30% da radiação solar é refletida para o espaço e cerca de 20% absorvida pelas nuvens e moléculas presentes no ar e 51% na superfície terrestre [8]. Como a terra é composta por cerca de três quartos de água, logo nem toda a radiação pode ser aproveitada na superfície terrestre.

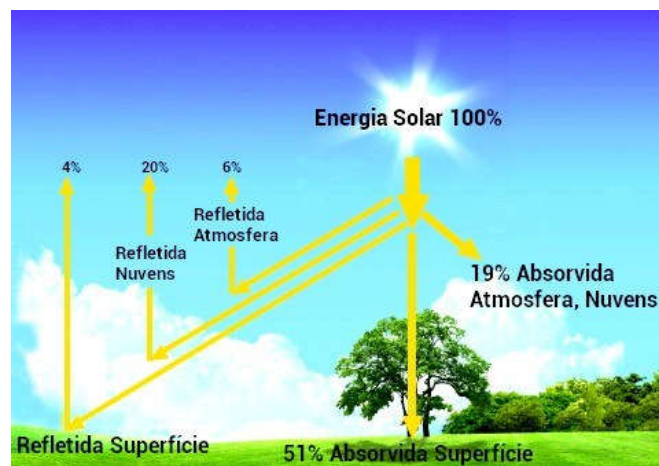


FIGURA 2.2 - TIPOS DE RADIAÇÃO INCIDENTE NA TERRA, [9].

2.1. Energia Solar

2.1.1 Relação Terra - Sol

A luz proveniente do sol é radiação eletromagnética de alta de frequência no intervalo espectral a que dá o nome de espectro luminoso. A radiação eletromagnética é caracterizada pela sua frequência (f) e pelos respectivos comprimentos de onda (λ), que se relacionam pela Equação (2.2) :

$$c = f \times \lambda \quad (2.2)$$

Sol transfere energia para a Terra através da luz que nos envia, isto é, radiação. A radiação solar refere-se à radiação eletromagnética emitida pelo Sol. Devido à grande distância entre o sol e a Terra, apenas uma parte mínima dessa radiação atinge a superfície terrestre, que corresponde a uma quantidade de energia de 1×10^{18} kWh/ano.

De toda a energia emitida pelo Sol ($3,9 \times 10^{26}$ J/s) apenas $1,8 \times 10^{17}$ J/s chega ao nosso planeta, devido ao fato de se encontrar, cerca de 150 milhões de quilômetros. O diâmetro de sol é aproximadamente $1,39 \times 10^9$ m, enquanto que a terra apresenta um diâmetro de $1,27 \times 10^7$ m e a esfera solar forma um ângulo de 32° para o observador presente na Terra (ver Figura 2.3) [10].

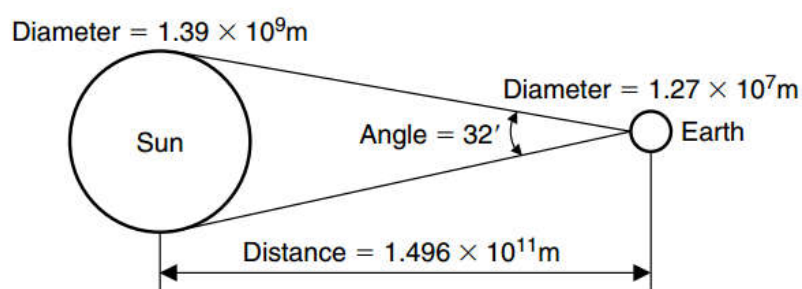


FIGURA 2.3 - RELAÇÃO TERRA - SOL, [10].

A Terra descreve uma órbita elíptica em redor do Sol ao longo de um ano, em que ocupa os extremos da elipse. Quando está mais afastada do Sol denomina-se de afélio e periélio quando a Terra está mais próxima do Sol. O movimento de translação da Terra em redor do Sol dura, aproximadamente, 365 dias, 5 horas, 48 minutos e 46 segundos (ver Figura 2.4). Ao longo da sua trajetória o eixo de rotação da Terra faz sempre o mesmo ângulo de $23,45^\circ$ entre a perpendicular e o plano elíptico [10].

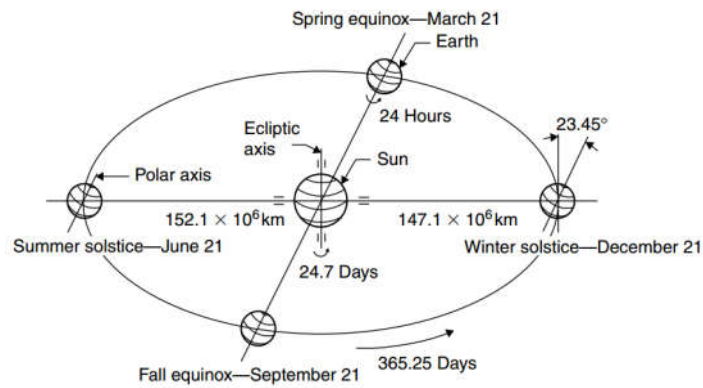


FIGURA 2.4 - ÓRBITA DESCRITA PELA TERRA EM TORNO DO SOL, [10].

2.1.2 Declinação Solar

Durante a translação da Terra, esta vai variando a sua declinação, o ângulo entre a direção da radiação solar e o plano do equador varia entre $\pm 23,45^\circ$ (ver Figura 2.5). Durante o solstício do Verão (21 de junho) a declinação solar é de $23,45^\circ$, a duração do dia é maior que a da noite e o Sol, encontrando-se sobre o Trópico de Câncer, nasce quase a nordeste e põe-se quase a noroeste. No solstício do Inverno (21 de dezembro), a declinação tem o mesmo valor, mas negativo. Nesse período o Sol encontra-se sobre o Trópico de Capricórnio e a duração do dia no Hemisfério Norte é inferior à da noite [10].

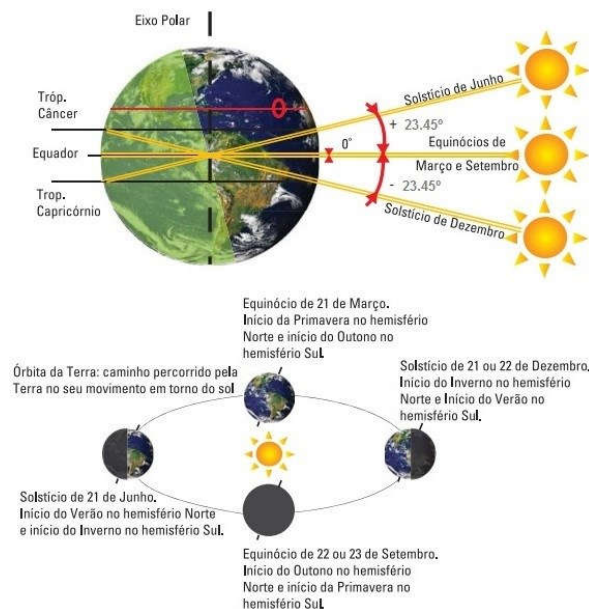


FIGURA 2.5 - DECLINAÇÃO SOLAR COM RESPECTIVOS EQUINÓCIOS E SOLSTÍCIOS, ADAPTADO DE [8].

Ao longo do ano a variação da declinação varia de acordo com a Figura 2.6:

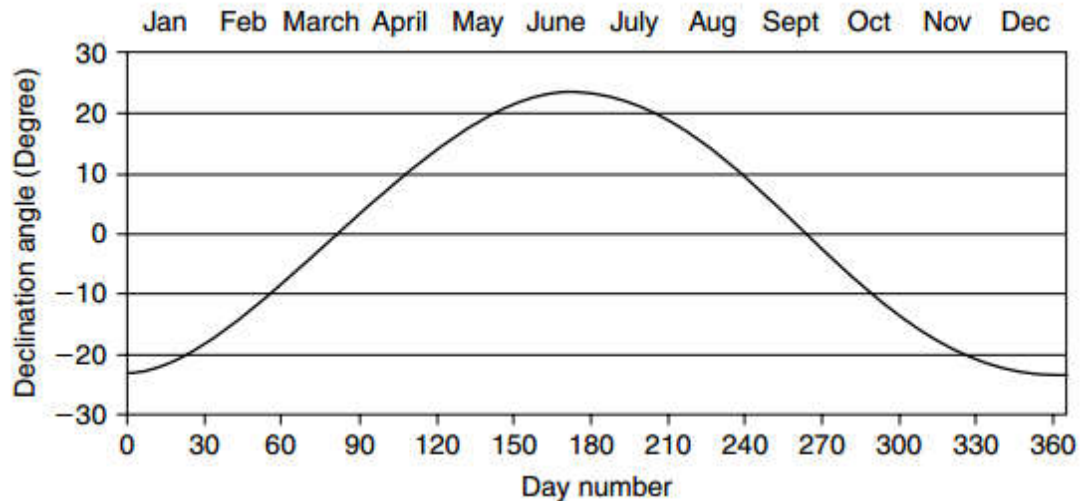


FIGURA 2.6 - VARIAÇÃO DA DECLINAÇÃO SOLAR AO LONGO DO ANO, [10].

A declinação solar pode ser calculada para cada dia do ano, N, a partir da Equação (2.3) [10]:

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad (2.3)$$

2.1.3 Hora solar aparente

O tempo de relógio padrão é contado a partir de um meridiano mais próximo do fuso horário ou a partir do meridiano Greenwich, que tem longitude de 0°. O movimento aparente do sol leva quatro minutos para atravessar 1° de longitude, desta forma deve-se multiplicar por quatro a longitude standard menos a longitude local, que deve ser adicionado ou subtraído para a hora local standard da localidade. Se o local é a este do meridiano de Greenwich é somado, se for a oeste é subtraído. A hora solar aparente pode ser calculada através da Equação (2.4) [10]:

$$AST = LST + ET \pm 4(SL - LL) - DS \left(\frac{\text{hora}}{\text{minuto}} \right) \quad (2.4)$$

Onde

AST = hora solar aparente;

LST = hora local standard;

ET = equação do tempo;

SL = longitude standard (fuso horário);

LL = longitude local;

DS = acerto horário.

2.1.4 Equação do Tempo

Devido a fatores associados à órbita da Terra em torno do Sol, a sua velocidade orbital varia ao longo do ano, de modo que a hora solar aparente varia ligeiramente do tempo médio mantido por um relógio. Esta variação é a chamada equação de tempo que surge porque o comprimento de um dia, não é uniforme ao longo do ano. Ao longo do ano, a duração média de um dia é de 24 h, no entanto, a duração de um dia varia devido à excentricidade da órbita da Terra e à inclinação do seu eixo. Assim a velocidade da órbita da Terra é mais rápida do que a sua velocidade média para a metade do ano (de outubro a março) e mais lenta do que a sua velocidade média para a restante metade do ano (de abril a setembro) (ver Figura 2.7). A equação do tempo expressa-se segundo a Equação (2.5) [10]:

$$ET = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B) \text{ (minutos)} \quad (2.5)$$

Onde

$$B = (N - 81) \left(\frac{360}{364} \right) \quad (2.5a)$$

Uma representação gráfica da Eq. (2.5), é mostrada através da Figura 2.7.

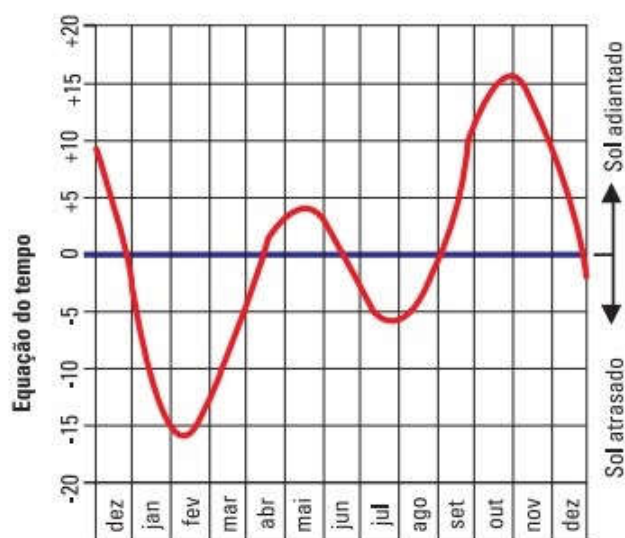


FIGURA 2.7 - CURVA DE CORREÇÃO DO TEMPO AO LONGO DO ANO, [8].

2.1.5 Ângulo solar horário (h)

O ângulo solar horário de um ponto na superfície da Terra é definido como o ângulo através do qual a Terra giraria para trazer o meridiano diretamente sob o Sol (ver Figura 2.8). O ângulo horário é 0° ao meio-dia solar, e obtém valores positivos nas horas da tarde e valores negativos nas horas da manhã. Uma hora de rotação da terra equivalem a 15° de longitude. O ângulo solar horário pode ser obtido através do tempo solar aparente da seguinte Equação (2.6) [10]:

$$h = (TSA - 12) \times 15^\circ \quad (2.6)$$

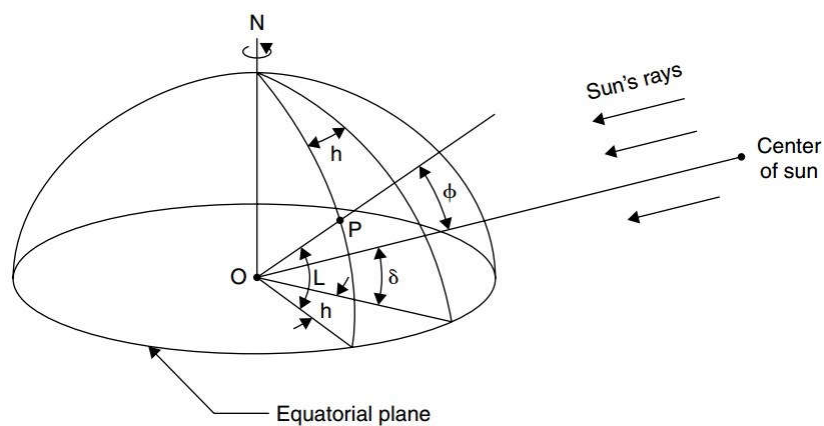


FIGURA 2.8 - DEFINIÇÃO DE LATITUDE (L), ÂNGULO HORÁRIO (h) E DA DECLINAÇÃO SOLAR (δ), [10].

2.1.6 Ângulo da altitude solar (α)

É o ângulo compreendido entre o raio solar e a projeção do mesmo sobre o plano horizontal. A altura solar está relacionada com ângulo solar zenital, ϕ , que é o ângulo entre os raios solares e a vertical como mostra a Figura 2.9. A altura solar pode ser calculada a partir da Equação (2.7) [10]:

$$\phi + \alpha = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \quad (2.7)$$

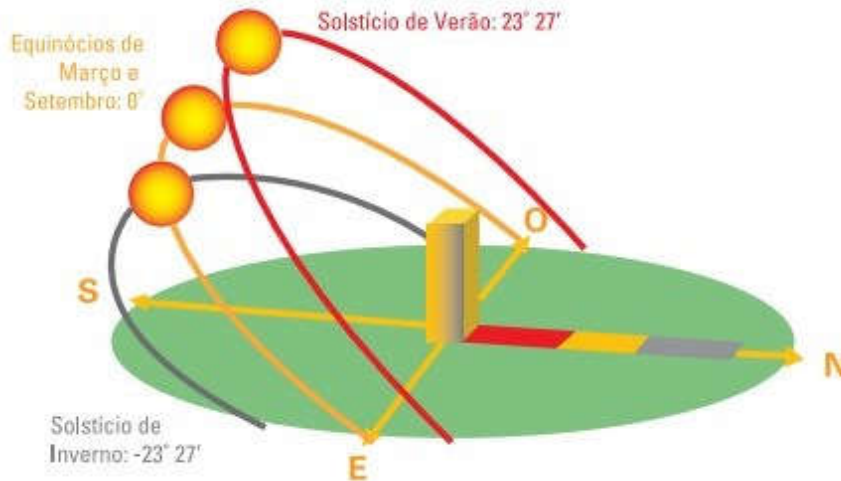


FIGURA 2.9 - VARIAÇÃO DA ALTURA SOLAR, [8].

Matematicamente o ângulo da altitude solar pode ser obtido a partir da Equação (2.8) [10]:

$$\sin(\alpha) = \cos(\phi) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \quad (2.8)$$

Onde L representa a latitude do local.

De enaltecer que quanto maior for a latitude do local, menor será a altura solar, logo, mais oblíquos incidirão os raios solares.

2.1.7 Ângulo solar azimutal (z)

É o ângulo formado pela projeção horizontal da linha perpendicular à superfície captadora e a linha que passa por esta e o sul geográfico, ou seja, é o ângulo que define a direção do movimento do Sol e indica quantos graus a superfície do painel fotovoltaico se desvia da direção sul exata (ver Figura 2.10). Ao meio-dia, o Sol está virado a sul no hemisfério norte e no hemisfério sul o Sol está virado a norte [8]. O ângulo solar azimutal expressa-se matematicamente segundo a Equação (2.9) [10].

$$\sin(z) = \frac{\cos(\delta) \times \sin(h)}{\cos(\alpha)} \quad (2.9)$$

A Equação (2.9) é válida, desde que, [7], $\cos(h) > \tan(\delta) / \tan(L)$. Se a condição não se verificar é efetuada uma correção do ângulo solar azimutal, ou seja, para as horas da manhã o ângulo solar azimutal é dado por $-\pi + |z|$ e para o período da tarde $\pi - z$.

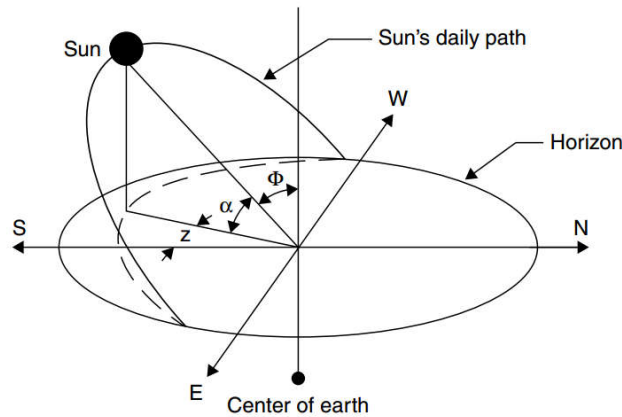


FIGURA 2.10 - PERCURSO DO SOL AO LONGO DO DIA DESDE O NASCER A PÔR-DO-SOL, [10].

2.1.8 Ângulo de nascer e pôr-do-sol (h_{ss})

O sol nasce e põe-se quando o ângulo de altitude solar é 0° , ou seja, o ângulo solar azimutal é igual a $\pm 90^\circ$. Este ângulo pode ser calculado através da Equação (2.10) [10]:

$$\cos(h_{ss}) = -\tan(L) \tan(\delta) \quad (2.10)$$

Sabendo-se que uma hora corresponde a 15° de longitude então é possível determinar a hora de nascer e pôr-do-sol a partir de h_{ss} . A duração do dia é o dobro da hora de pôr do sol, desde que o meio dia solar esteja no meio das horas do nascer e pôr-do-sol. Assim a duração de um dia solar é dada pela Equação (2.11) [10].

$$\text{Duração do dia} = 2/15 \cos^{-1}(h_{ss}) \quad (2.11)$$

2.1.9 Ângulo de incidência (θ)

O ângulo de incidência, θ , é o ângulo formado entre os raios solares e a componente de uma determinada superfície (ver Figura 2.11). Para um plano horizontal, o ângulo de incidência, θ , e o ângulo de zênite, ϕ , são iguais. A Equação (2.12) permite determinar o ângulo de incidência para uma determinada superfície é dada por [10]:

$$\begin{aligned}
\cos(\theta) = & \sin(L) \sin(\delta) \cos(\beta) \\
& - \cos(L) \sin(\delta) \sin(\beta) \cos(Z_s) \\
& + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \cos(\beta) \\
& + \sin(L) \cos(\delta) \cos(h) \sin(\beta) \cos(Z_s) \\
& + \cos(\delta) \sin(h) \sin(\beta) \sin(Z_s)
\end{aligned}
\tag{2.12}$$

Onde

β = ângulo de inclinação da superfície, em relação à horizontal.

Z_s = ângulo de azimute da superfície, ângulo entre a normal à superfície em relação ao verdadeiro sul, e toma valores positivos a oeste.

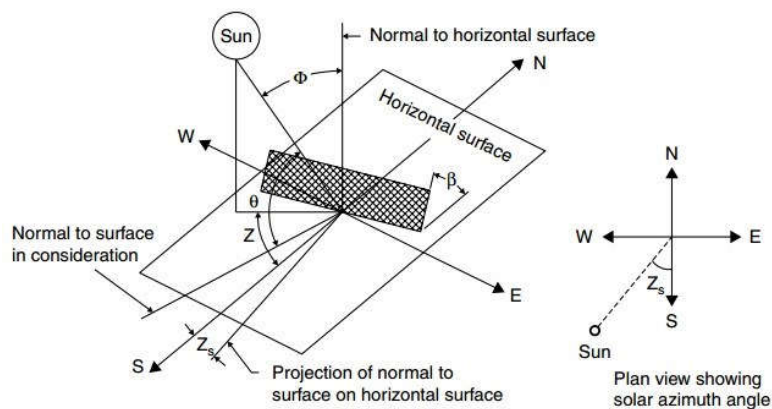


FIGURA 2.11 - ÂNGULOS SOLARES, [10].

Em sistemas em que os equipamentos de medição da radiação solar estão equipados com seguimento solar a dois eixos (*tracking*), ou seja, os sistemas mantêm sempre a superfície em questão orientada para o sol, sendo que nestes casos o valor do ângulo de incidência, θ , é de 0° .

2.2 Radiação solar direta, difusa e global

A natureza da radiação solar que alcança a terra e a terminologia normalmente usada para descrever as componentes da radiação incidente são fundamentais para um melhor conhecimento da radiação solar [11]. Perto do meio dia solar num dia limpo, cerca de 25% da radiação solar incidente fora da atmosfera é dispersada e absorvida ao passar através da atmosfera da Terra. A radiação solar que alcança a superfície da Terra, numa superfície normal à radiação solar, é cerca de 1000 W/m^2 [11]. Este

feixe de radiação, que vem na direção do sol, é designado de radiação direta normal (DNI).

Alguns da luz solar dispersa é refletida de novo para o espaço, e alguns alcança a superfície da terra (ver Figura 2.12). A radiação que é dispersa e chega à superfície é chamada de radiação horizontal difusa (DHI). Alguns radiação é também dispersa pela superfície da terra e dispersa novamente pela atmosfera para o observador. Esta é a parte da radiação difusa horizontal que o observador vê. A quantidade total de luz solar numa superfície horizontal é chamada de radiação global horizontal (GHI).

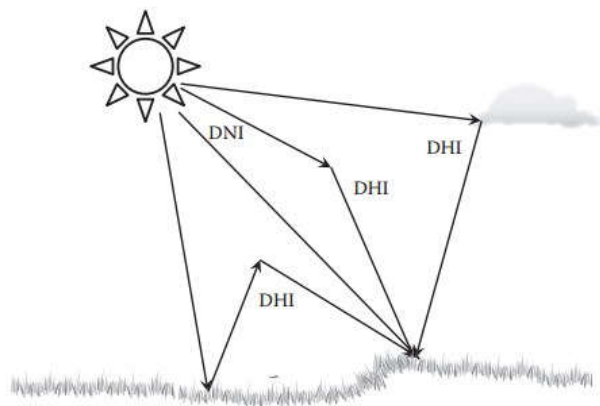


FIGURA 2.12 - COMPONENTES DA RADIAÇÃO SOLAR, [11].

A radiação solar é um fluxo de energia medido em potência (geralmente em watts) por unidade de área (usualmente em metros quadrados). Quando a direção do fluxo é normal à superfície, a quantidade de fluxo é a melhor nessa situação. A quantidade de energia por unidade de área diminui com o cosseno do ângulo entre a normal à superfície e o ângulo incidente. No caso do DNI, o ângulo incidente é o ângulo solar zenital. A Figura 2.13 engloba o GHI, DHI e o DNI num dia de céu limpo. O valor do DNI é influenciado pela quantidade de atmosfera existente através pela qual ele atravessa. Durante a maior parte do dia a massa de ar varia lentamente, mas muda rapidamente nas horas da manhã e da tarde. Na Figura 2.13 é possível observar que a radiação difusa é apenas cerca de 10% da radiação máxima global. Tipicamente, num dia de céu limpo, a radiação solar global horizontal quando representada em gráfico tem a forma típica de um sino ou forma de cosseno [12].

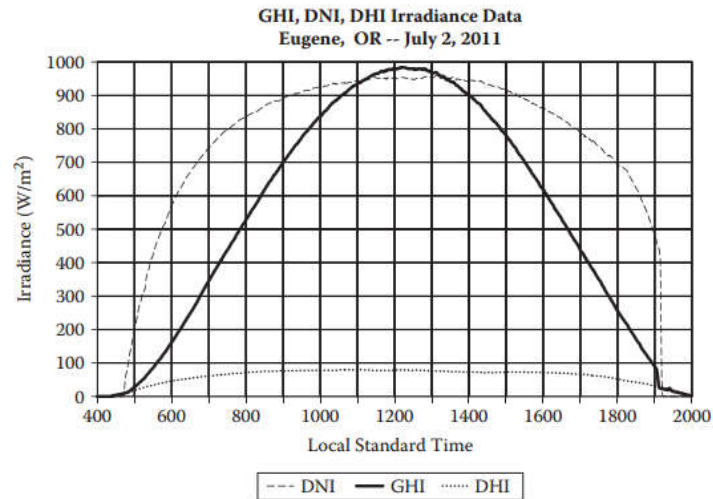


FIGURA 2.13 – DADOS DAS COMPONENTES DA RADIAÇÃO SOLAR NUM DIA LIMPO, [12].

A radiação global numa superfície horizontal é igual à radiação solar direta normal vezes o cosseno do ângulo solar de zénite mais a radiação difusa e é obtida através da Equação (2.13) [8]:

$$GHI = DNI * \cos(sza) + DHI \tag{2.13}$$

Onde sza é o ângulo solar zenital, o ângulo entre o zénite e a direção solar. Esta é a exata expressão para radiação instantânea e torna-se uma aproximação da radiação solar medida ao longo de um intervalo de tempo devido ao cosseno do ângulo solar zenital variar com o tempo. Durante curtos espaços de tempo, a radiação GHI pode ser maior do que a radiação extraterrestre que alcança a órbita solar devido às nuvens refletirem uma boa parte da radiação incidente no instrumento de deteção. Este efeito é chamado efeito ótico das nuvens na lente do piranómetro (ver Figura 2.14) [12].

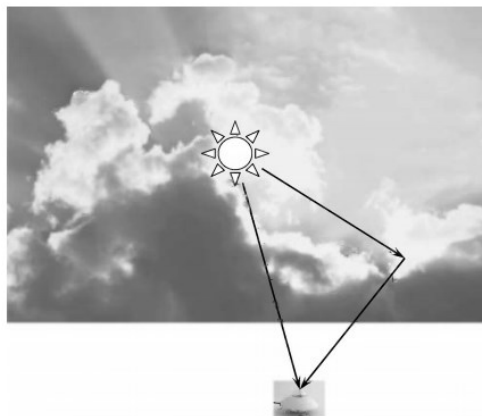


FIGURA 2.14 - EFEITO ÓTICO DAS NUUVENS NA LENTE DO PIRANÓMETRO, [12].

A quantidade de luz solar dispersa pela superfície, chamada de radiação refletida pela superfície, depende do albedo da superfície. O albedo é a relação da radiação solar refletida com a radiação que é refletida de novo para o céu para a radiação incidente GHI. O albedo pode variar desde 0.1 para superfícies negras, 0.2 para pastagens, 0.8 para neve fresca. Uma superfície perfeitamente refletora tem um albedo de 1. Nestes casos a atmosfera irá dispersar alguma da luz refletida de novo para a superfície, áreas com números de albedo altos terão uma maior componente de difusa devido às múltiplas reflexões na superfície.

2.3 Radiação Direta Normal (DNI)

A radiação solar que chega normal à superfície da Terra que vem diretamente do sol é definido como DNI. Mesmo se o céu estiver limpo (de nuvens), o DNI é menor do que seria se fosse medido no topo da atmosfera terrestre porque o DNI é submetido a dispersões (por moléculas e aerossóis) e por absorções (por gases e aerossóis) ao longo da atmosfera terrestre. Se as nuvens estiverem entre o sol e o observador, e se forem opticamente espessas, então nenhuma radiação direta normal alcança a superfície terrestre. O GHI observado à superfície é uma mistura de DNI que alcança a superfície da terra sem ter sido dispersado ou absorvido e por DHI, a radiação resultante a partir de dispersão em moléculas, aerossóis e nas nuvens.

A partir da Figura 2.13 é possível observar que a linha preta sólida é GHI e é a soma da componente direta normal com a horizontal em cinzento (primeiro termo da Equação (2.13) mais a linha de pontos DHI (o segundo termo da Equação (2.13))). Isto é consistente ao longo do dia até o sol ser completamente bloqueado e o primeiro termo do lado direito vai para zero, deixando GHI igual ao DHI entre as 16:00 e as 17:00 e depois das 17:30 onde a linha preta sólida e a linha de pontos coincidem.

A radiação direta normal é a única componente de luz solar que pode ser usada para tecnologias de concentração de energia solar tais como concentradores de energia solar (CSP), sistemas térmicos que produzem vapor para gerar eletricidade e sistemas de concentração fotovoltaica (CPV), que produzem eletricidade diretamente. Painéis solares térmicos como os que aquecem água e os fotovoltaicos que produzem eletricidade, podem usar qualquer componente da radiação incidente: luz solar direta, luz solar que foi dispersa pelas nuvens, moléculas e aerossóis na atmosfera, ou luz solar refletida na superfície. O DNI tem um papel importante para painéis solares

planos porque oferece a maior densidade de energia para conversão. Como mostra a Figura 2.13, a área sob a curva do DNI pode representar a maior quantidade de energia solar disponível por dia. Os coletores solares planos podem ser instalados em estruturas fixas, ajustáveis ou com sistema de seguimento de forma a otimizar a conversão de energia.

A escolha de um pireliómetro para a medição do DNI é tipicamente menos dispendioso do que um bom piranómetro usado para medir GHI [12], o pireliómetro é rigorosamente apontado para o sol desde o nascer ao por do sol.

2.4. Instrumentos de medição de radiação solar

A caracterização da radiação solar é uma ferramenta necessária para o dimensionamento de um projeto, avaliação da performance do sistema a instalar e pesquisa de novas aplicações da energia solar. Vários tipos de equipamentos são utilizados para medições instantâneas e de longa duração da radiação solar direta, difusa e global à superfície. Estes tipos de equipamentos usam efeitos termoelétricos e fotovoltaicos para realizar a medição da radiação solar [10].

Existem basicamente dois tipos de instrumentos de medição da radiação solar: o piranómetro e o pireliómetro. Estes serão descritos de seguida.

2.4.1 Piranómetro

Este aparelho é o mais comum neste tipo de aplicações e tem a capacidade de medir a radiação solar global numa superfície horizontal (ver Figura 2.15). As características de um típico piranómetro podem ser observadas na Figura 2.16. Com a introdução de um anel ou de uma bola de sombreamento com o objetivo de criar sombreamento na cúpula do instrumento e assim obstruir a radiação solar direta permitindo medir a radiação solar difusa (ver Figura 2.17). O sistema de anel de sombreamento necessita de ajustes ao longo do ano de modo a acompanhar o movimento aparente do sol. No caso do sombreamento com as bolas, este sistema já tem integrado um sistema de posicionamento global (*GPS*) que permite acompanhar o movimento do sol ao longo do ano [12].



FIGURA 2.15 - PIRANÓMETRO CM6B DA KIPP & ZONEN, [13].

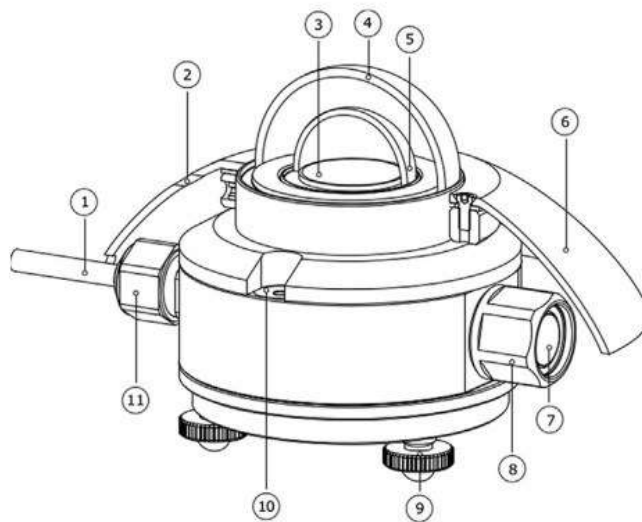


FIGURA 2.16 - TÍPICO PIRANÓMETRO. O DETALHE DOS COMPONENTES INCLUI: 1. CABO DE SINAL, 2. FURO PARA FIXAR O ECRÃ DE RADIAÇÃO, 3. SENSOR TERMOPILHA (CORPO NEGRO), 4. CÚPULA DE VIDRO, 5. CÚPULA DE VIDRO, 6. ECRÃ DE RADIAÇÃO. 7. INDICADOR DE HUMIDADE, 8. DESSECANTE, 9. PÉS NIVELÁVEIS, 10. NÍVEL (BOLHA), 11. ROSCA DE FIXAÇÃO DO CABO, [12].

O funcionamento base do piranómetro baseia-se numa termopilha que mede a diferença de temperaturas entre duas superfícies, pintadas de cores distintas uma de preto e outra de branco, e iluminadas de igual forma, que dilatam quando se verifica um aumento da temperatura. A diferença de potencial, provocada pela expansão das duas superfícies, após a sua medição indica o valor instantâneo da energia solar [12].

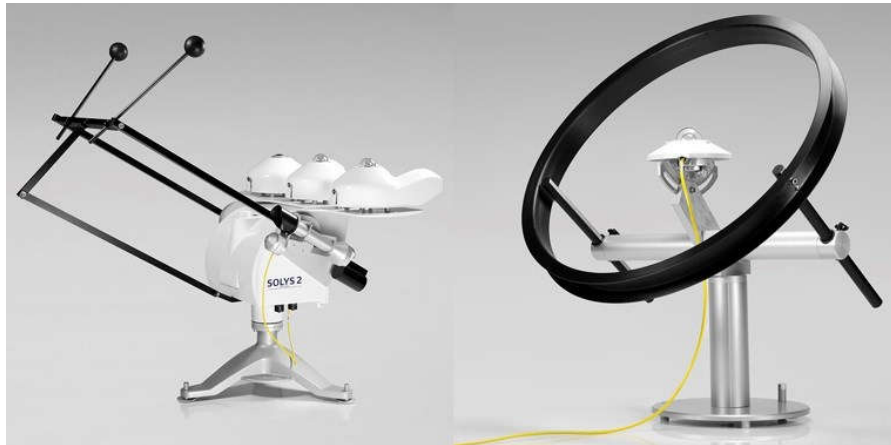


FIGURA 2.17 - ANEL E BOLA DE SOMBREAMENTO DA KIPP & ZONEN, [14] E [13].

2.4.2 Pireliómetro

De forma a obter apenas a radiação solar direta é utilizado o pireliómetro. Este consiste num tubo cilíndrico alinhado paralelamente à perpendicular do plano, ou ao longo da normal ao plano horizontal. Desde que a normal ao plano acompanha o Sol, o tubo irá apontar para o Sol igualmente. Situando a entrada de abertura do pireliómetro, um campo de visão limitando a abertura e defletores de luz no interior do tubo, desta forma um ângulo sólido de campo de visão bem definido pode ser estabelecido (ver Figura 2.18) [15].

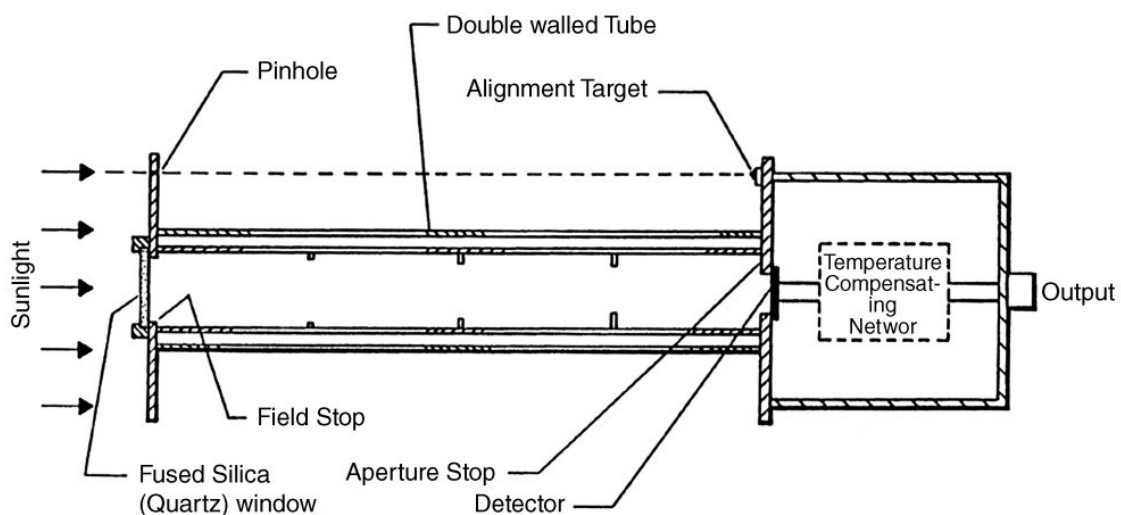


FIGURA 2.18 - TÍPICA CONSTRUÇÃO DE UM PIRANÓMETRO, [15].

A construção do pireliómetro consiste num tubo com visão limitada, com um revestimento preto no seu interior, selado para todas as condições de tempo com um detetor na parte inferior do tubo, e um vidro de proteção de alta transmissividade no final do tubo apontando para o sol. Defletores no interior do tubo limitam as reflexões

que gerariam incorretos valores ao detetor. As dimensões físicas do detetor, tubo, e aberturas determinam o ângulo sólido do campo de visão do detetor [15].

O detetor geralmente é uma termopilha, composta por um conjunto de termopares. Estes são constituídos por metais condutores em contato uns com os outros numa termojunção. Esta junção cria um potencial elétrico dependendo da diferença de temperaturas entre uma junção e uma outra junção semelhante localizada para detetar uma temperatura de referência que de seguida é convertido num valor da radiação no instante em W/m^2 [15]. O equipamento utilizado para realizar as medições no Centro de Geofísica de Évora é o CHP1 da Kipp & Zonen.

Os equipamentos de medição acima referidos ambos são monitorizados no seguidor solar SOLYS2 da Kipp & Zonen (ver Figura 2.19).



FIGURA 2.19 - SEGUIDOR SOLAR SOLYS2 DA KIPP & ZONEN, [16].

2.5. Propriedades atmosféricas que afetam a radiação solar

Como já foi referido anteriormente a radiação solar à superfície é dispersa, absorvida e transmitida com base nas quantidades e tipos de constituintes atmosféricos presentes na atmosfera que intervêm e das suas propriedades radiativas dependentes do comprimento de onda. Como mostra a Figura 2.20, as nuvens têm uma maior influência na quantidade e tipo de radiação solar disponível para conversão de energia. As previsões de radiação solar são altamente dependentes da capacidade de prever as condições das nuvens durante os intervalos das previsões. Informações sobre os tipos de nuvem, altura, movimento relativo e áreas de formação ou dissipação são algumas variáveis de entrada para as previsões da radiação solar. Informações mais detalhadas da composição das nuvens, tais como, a espessura ótica, percurso de água líquida ou congelada e o raio efetivo de gotículas podem ser utilizadas para representar as propriedades de transferência radiativa das nuvens para as previsões de radiação solar [17].

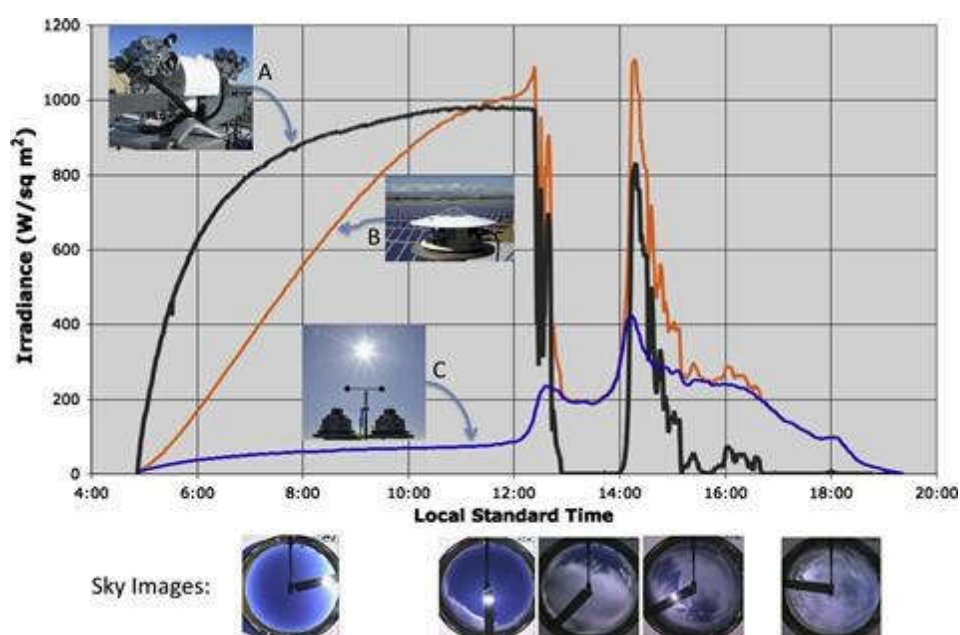


FIGURA 2.20 - SÉRIE TEMPORAL DAS COMPONENTES DA RADIAÇÃO SOLAR PARA CONDIÇÕES DE CÉU LIMPO E COM PERÍODOS COM NUVENS MEDIDOS POR UM PIRELIÓMETRO (A = DNI) E PIRANÓMETRO (B = GHI; C = DHI) E AS CORRESPONDENTES IMAGENS DO CÉU DURANTE O DIA 19 JULHO DE 2012 NO COLORADO, [17].

Dias de céu limpo também produzem complexas interações entre radiação solar e a composição variável da uma atmosfera “limpa”. A quantidade e os tipos de aerossóis atmosféricos, bem como as quantidades de vapor de água total, o ozono e outros constituintes, influenciam a quantidade total e a distribuição espectral da radiação

solar disponível para um coletor solar. A Figura 2.21 é um bom exemplo da previsão da variabilidade anual devido à órbita da terra e os efeitos periódicos devido ao aumento de aerossóis atmosféricos em medições de DNI em dias de céu limpo [14].

Sob condições de céu limpo, a dispersão da radiação solar por aerossóis atmosféricos diminuiu o DNI e aumenta o DHI. Esta redistribuição de radiação perto do disco solar é chamada de radiação circum-solar. Esta acontece devido à dispersão de Mie, que preferencialmente redireciona os fótons na direção de propagação do raio. A quantidade desta radiação é importante para qualquer tipo de tecnologia de concentração solar. Condições atmosféricas que criam grandes quantidades de radiação circum-solar afetam a forma do sol ou a quantidade de DNI disponível para um concentrador solar (ver Figura 2.22 e Figura 2.23) [17].

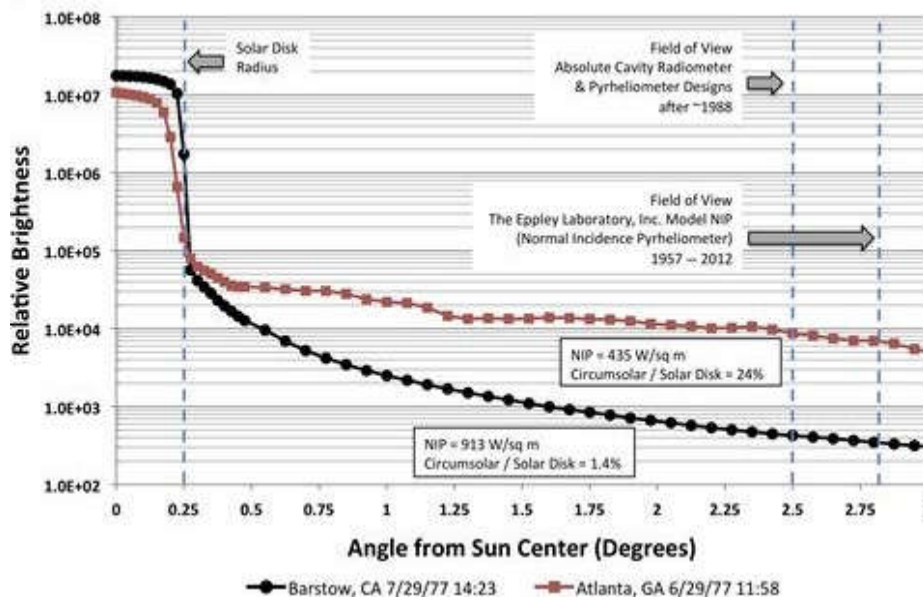


FIGURA 2.21 - MEDIÇÕES A PARTIR DE TELESCÓPICOS CIRCUM-SOLARES NA CALIFÓRNIA E GEÓRGIA E O CAMPO DE VISÃO DE UM PIRANÓMETRO, [17].



FIGURA 2.22 - IMAGEM DE UM DIA COM CONCENTRAÇÃO BAIXA DE AEROSSÓIS COM CONDIÇÕES DE PROFUNDIDADE ÓTICA DE (≈ 0.1) NO COLORADO, [17].



FIGURA 2.23 - IMAGEM DE UM DIA COM ALTA CONCENTRAÇÃO DE AEROSSÓIS (≈ 0.5) EM RIYADH, ARÁBIA SAUDITA, [17].

A distribuição espectral da radiação solar à superfície da Terra é importante para tecnologias de conversão de energia solar, especialmente para o projetos e testes de desempenho de dispositivos fotovoltaicos. Cerca de 97% da radiação disponível a partir do espectro solar está compreendida entre o comprimento de onda de 290 nm até 3000 nm (Figura 2.24). O espectro solar no topo da atmosfera é muito constante, aproximando-se da radiação emitida por um corpo negro a 5520 K. A atmosfera atua constantemente como um filtro ótico variável produzindo diferentes distribuições espectrais de radiação disponível a partir das mudanças das quantidades de DNI, DHI e GHI [14].

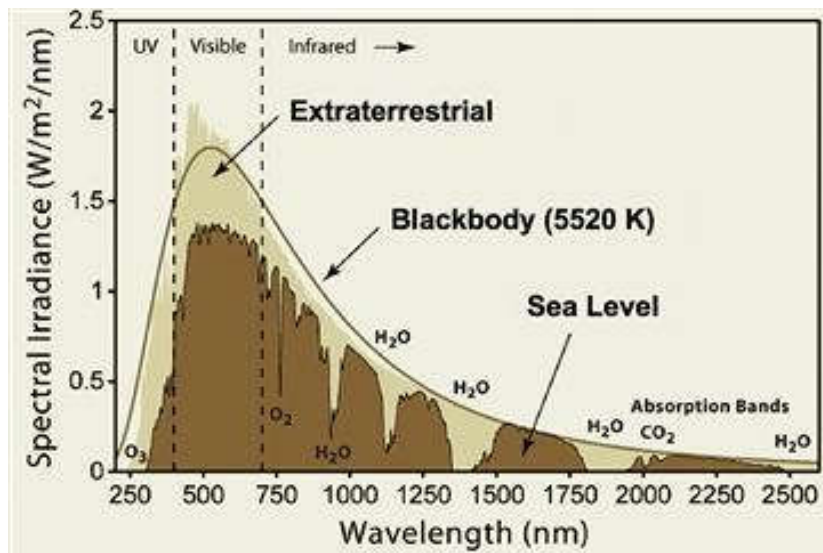


FIGURA 2.24 - DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO SOLAR ACIMA DA ATMOSFERA (EXTRATERRESTRE) E À SUPERFÍCIE DA TERRA DEPOIS DA ABSORÇÃO PELOS GASES ATMOSFÉRICOS (NÍVEL DO MAR), E RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO A UMA TEMPERATURA DE 5520 K, [17].

Em dias de céu sem nuvens, a quantidade de atmosfera que o DNI deve penetrar é chamada de comprimento do percurso atmosférico ou massa relativa de ar (AM). Quando o sol está sobre um objeto numa zona ao nível do mar, o seu comprimento do percurso atmosférico é 1.0 (i.e., AM 1.0). A Figura 2.25 ilustra a dependência da posição relativa solar com posição do observador (coletor solar). Como AM 1.0 não pode ser alcançada em todas as localizações e estações, o espectro solar padrão para dias de céu limpo para a modelação de desempenho de um painel fotovoltaico é de AM 1.5 (ver Figura 2.26) [17].

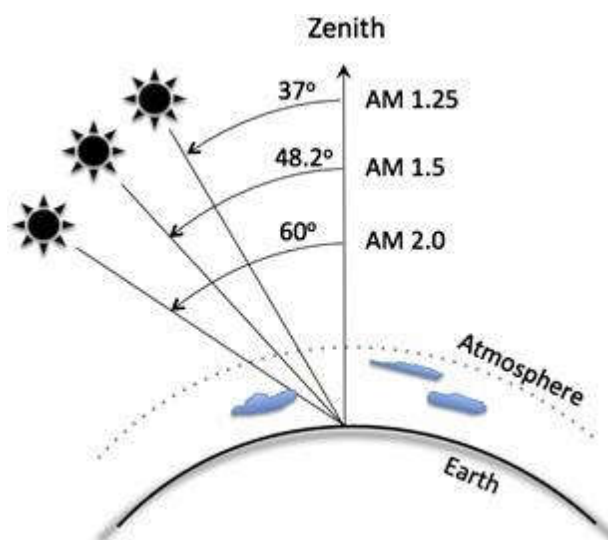


FIGURA 2.25 - DEPENDÊNCIA DA MASSA DE AR NA POSIÇÃO RELATIVA EM RELAÇÃO A UM OBSERVADOR, [14].

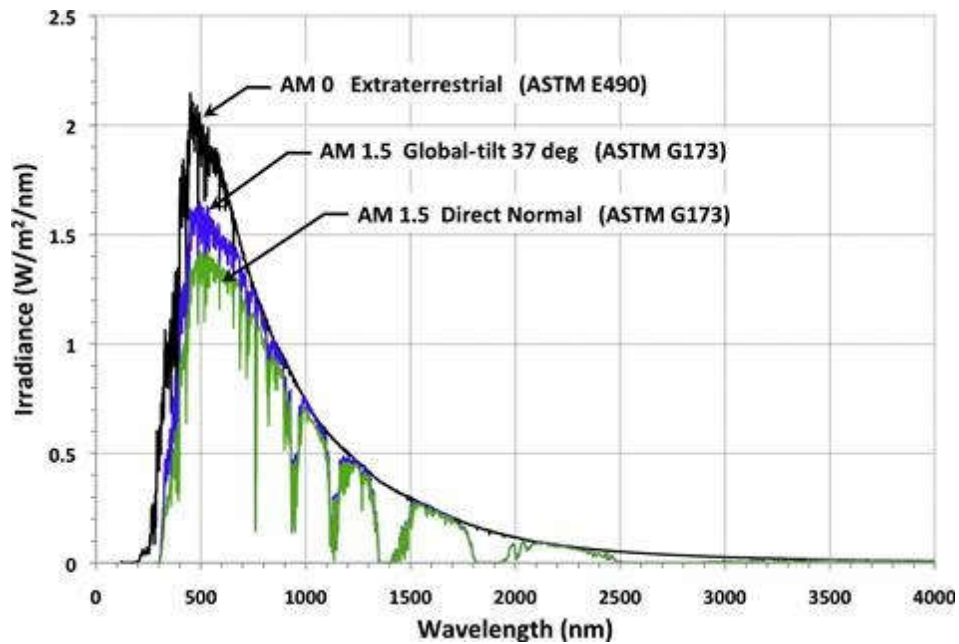


FIGURA 2.26 - ESPETRO SOLAR PADRÃO ELABORADO PELA AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM), [17].

Métodos para preverem a radiação solar tem de ter em atenção a posição solar e a variabilidade das propriedades atmosféricas, bem como os impactos dessas propriedades na quantidade de energia solar disponível para um sistema de conversão de energia solar. Como mostra a Figura 2.27 os métodos são aplicados dinamicamente com base no período de previsão desejados. A abordagem básica é primeiramente estimar a radiação num dia de céu limpo disponível para um coletor solar com base em valores detetados climatologicamente ou remotamente detetados valores de constituintes atmosféricos, e em segundo ter em consideração a presença de nuvens. Dependendo do intervalo de previsão, a presença de nuvens pode ser baseada em observações a partir do solo, de satélites ou a partir de estimativas baseadas na previsão numérica do tempo. A partir da Figura 2.27 pode-se observar os vários elementos constituintes da previsão solar até à produção de eletricidade.

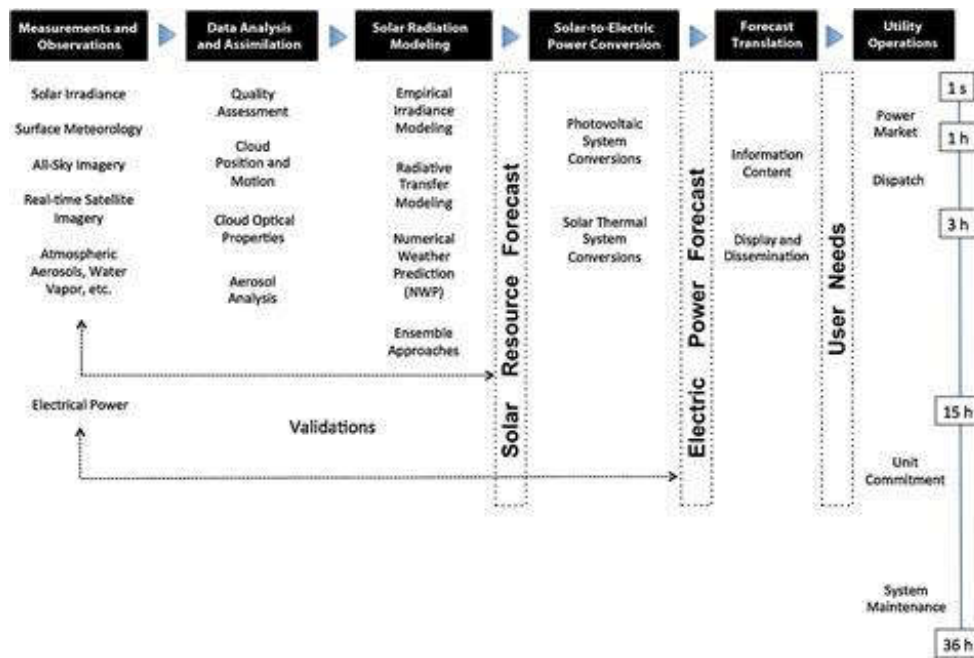


FIGURA 2.27 - ELEMENTOS DO PROCESSO DA PREVISÃO DA RADIAÇÃO SOLAR PARA NECESSIDADES OPERACIONAIS ELÉTRICAS, [17].

2.6. Radiação em dias de céu limpo

A radiação solar em dias de céu limpo representa a radiação global e direta, GHI e DNI respectivamente, disponível à superfície da Terra para uma determinada localização e período na ausência de nuvens. Estas condições de radiação são em função da:

- Irradiação extraterrestre;
- Posição do sol no céu quantificado pelo ângulo solar zenital;
- Elevação acima do nível do mar
- Composição de gases atmosféricos, especialmente vapor de água e teor de ozono;
- Conteúdo de aerossol atmosférico;

O ângulo solar zenital e elevação acima do nível do mar definem o comprimento de percurso (massa de ar) da radiação extraterrestre deve efetuar até alcançar a superfície terrestre. O comprimento deste percurso influencia a quantidade de radiação solar que é espalhada e/ou absorvida ao longo do caminho por moléculas de gases atmosféricos e outros constituintes [17]

O termo turvação é frequentemente utilizado para descrever o efeito combinado de aerossóis e vapor de água. Esta é caracterizada pela transparência da atmosfera. A atmosfera mais transparente possível é conhecida como a atmosfera de Rayleigh, que contém apenas moléculas de ar (O_2 , N_2 e vestígios de gases). A turvação se sobrepõe a este caso ideal e é principalmente uma função do conteúdo de aerossol e, em menor grau, do teor de vapor de água e ozono [17].

Os aerossóis são formados por pequenas partículas (sólidas ou líquidas) no ar originados a partir de várias fontes como sais marinhos, combustão de biomassa, pólen, poeiras do deserto, poluição por fontes industriais e de transporte, como por outras atividades humanas. Eles são temporariamente e espacialmente altamente variáveis, e seu efeito radiativo é quantificado pela espessura ótica dos aerossóis (AOD). A AOD depende do tamanho, tipo e composição química dos aerossóis e varia em função do comprimento de onda da radiação [18]. Para os modelos operacionais de energia solar, a dependência espectral é ignorada considerando o impacto médio do aerossol em todo o espectro. De realçar que o espectro de AOD a 700 nm é considerado com um valor aceitável de AOD [19]. Geralmente o AOD varia entre valores de 0,05 e 0,2 para baixa turvação atmosférica e valores ocasionais muito extremos de 0,8 e superiores na África central e ocidental, no sudoeste e centro Asiático, no norte da Índia e em várias regiões da China (ver Figura 2.28).

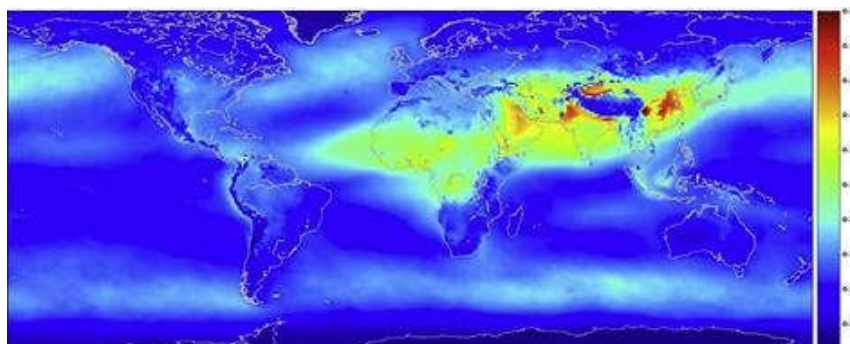


FIGURA 2.28 - MAPA GLOBAL MOSTRANDO A MÉDIA DE ADO 670 NO ANO DE 2009, CALCULADO PELO MONITORING ATMOSPHERIC COMPOSITION AND CLIMATE (MACC), A BASE DE DADOS FOI DESENVOLVIDA PELO ECMWF. A COR DA ESCALA VARIA ENTRE 0.02-0.60, [17].

O vapor de água tem impacto na radiação em condições de céu limpo através da absorção da radiação solar recebida perto da região do infravermelho do espectro solar. Este também influencia a condensação em torno do núcleo dos aerossóis que

influenciam a AOD. O valor anual de vapor de água (água precipitável) para o ano de 2009 é mostrado na Figura 2.29.

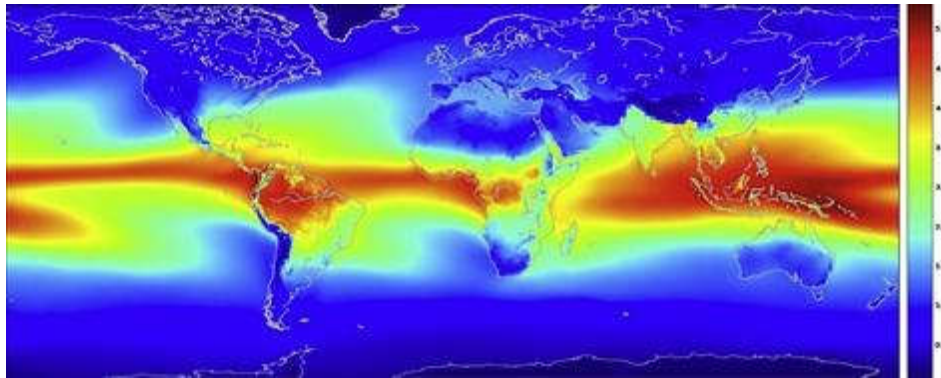


FIGURA 2.29 - MAPA GLOBAL MOSTRANDO A MÉDIA ANUAL DE ÁGUA PRECIPITÁVEL EM 2009, CALCULADO PELO NOAA/NCEP CLIMATE FORECAST SYSTEM REANALYSIS . AS UNIDADES SÃO EM KG/M², [14].

O impacto do ozono na radiação solar acontece através da absorção de uma porção de UV do espectro solar. O conteúdo do ozono é quantificado em unidades Dobson (du), representando a coluna equivalente de ozono em unidades de espessura de 0,01mm à pressão superficial. A absorção do ozono é uma componente muito importante para modelos resolvidos espectralmente ou modelos focados na parte UV da radiação solar [20]. Assim, muitos modelos não são têm em conta a variabilidade do ozono e usam um valor constante [20]. Em climas temperados, o ozono varia tipicamente entre os 250 e 350 du, mas pode chegar a valores de 150 ou inferiores em regiões polares no inverno.

Em dias de céu limpo o DNI é mais influenciado pelo AOD, depois pelo vapor de água e de seguida pelo ozono. A altura do solo é o fator menos efluente para a diminuição da quantidade de DNI. A Figura 2.30 mostra a comparação do impacto no DNI num dia de céu limpo com situações em que ocorre o dobro da quantidade de ozono, de vapor de água, de AOD e de massa de ar e metade da altura.



FIGURA 2.30 - COMPARAÇÃO DO IMPACTO NO DNI NUM DIA DE CÉU LIMPO COM SITUAÇÕES EM QUE OCORRE O DOBRO DE AOD, O DOBRO DE VAPOR DE ÁGUA, O DOBRO DO OZONO, O DOBRO DA MASSA DE AR E UMA REDUÇÃO DA ALTURA DO SOLO EM 50%, TENDO COMO CASO BASE UMA MASSA DE AR DE 1.5, 1100M ALTURA, AOD = 0.03, VAPOR DE ÁGUA = 0.75CM, E OZONO = 320 DU, [17].

3. Estado da arte da previsão da radiação solar

A arte de previsão do tempo teve o seu início nas antigas civilizações usando os eventos meteorológicos e astronómicos para ajudar a acompanhar as mudanças sazonais do clima. Por volta de 650 A.C. o povo babilónio tentou prever as mudanças de curto prazo baseando-se no aparecimento de nuvens e fenómenos óticos, como halos por exemplo. No ano 300 A.C., os astrónomos chineses foram capazes de desenvolver um calendário que dividia o ano em vinte quatro festivais, cada um associado ao diferente tipo de tempo ao longo do ano [21].

No ano 340 A.C. o filósofo grego Aristóteles escreveu o livro *Meteorologica*, que incluía teorias sobre a formação de nuvens, chuva, granizo, vento, relâmpagos, trovões e furacões. Apesar de muitas das reivindicações serem erradas, só a partir do século XVII que muitas das suas reivindicações foram derrubadas [21].

Ao longo dos tempos foram realizadas tentativas para produzir previsões baseadas no conhecimento do tempo e observações pessoais, mas estas vieram-se a tornar insuficientes e era necessário um maior conhecimento da atmosfera. Assim foram necessários instrumentos para medir as propriedades da atmosfera, tais como a humidade, pressão e temperatura. O primeiro instrumento a ser inventado com esse fim foi o higrómetro, medidor de humidade, pelo alemão Nicholas Cusa no século XV. No final do século seguinte o italiano Galileo Galileu inventou o termómetro e pouco tempo depois outro italiano o Evangelista Torricelli inventou o barómetro para medir a pressão atmosférica [21].

Ao longo dos séculos estes instrumentos foram refinados, e alguns indivíduos em locais por todo o planeta começaram a fazer e a registar as suas próprias medições atmosféricas e com a invenção do telégrafo no século XIX que veio a permitir uma transmissão de dados climáticos entre observadores e a criação de mapas de vento e de tempestades. No ano de 1860 começaram a surgir as primeiras estações de observação meteorológica por todo o mundo.

Com a formação a nível regional e global de redes de observação meteorológica nos séculos XIX e XX, houve um maior número de dados disponíveis para a observação da previsão do tempo.

A previsão numérica do tempo (PNT) é uma área muito recente que se desenvolveu no início da década de cinquenta do século XX, logo a seguir à segunda grande guerra mundial, com grandes desenvolvimentos com os avanços na computação. As técnicas implementadas neste tipo de previsão são para resolver equações que descrevem o comportamento da atmosfera, tais como, o cálculo de futuros valores numéricos das propriedades da atmosfera a partir de valores iniciais que são conhecidos através de observações meteorológicas [22].

As equações utilizadas são normalmente equações de mecânica dos fluídos que já estavam estabelecidas no século passado e para as quais certas simplificações são aplicadas. Essas simplificações são justificadas pelas ordens de magnitude dos diversos termos na atmosfera da Terra. O uso de computadores é essencial para a resolução desses sistemas de equações não lineares, que na maior parte dos casos não se conseguem resolver analiticamente.

Um modelo numérico da atmosfera é concebido em duas fases separadas:

- I. É estabelecido um sistema de equações para reger o comportamento contínuo da atmosfera;
- II. Através de um algoritmo próprio são obtidas as soluções, por um processo de discretização, das equações das variáveis contínuas para variáveis discretas.

Os resultados da previsão numérica, ou seja, as soluções de equações discretizadas da meteorologia dinâmica, dependem da discretização do processo empregue.

3.1 Previsão numérica do tempo

Ao longo do século XX a história da previsão numérica do tempo teve várias etapas que foram importantes para o seu desenvolvimento.

Em 1904, o físico e meteorologista norueguês Vilhelm Bjerknes, para muitos um dos fundadores da previsão da meteorologia moderna, reconheceu que a previsão do tempo é fundamentalmente um problema de condições iniciais determinista no sentido matemático [13]:

Se é verdade, como muitos cientistas acreditam, que os estados atmosféricos subsequentes se desenvolvem a partir dos precedentes de acordo com as leis da

física, então é evidente que as condições necessárias e suficientes para solução racional dos problemas da previsão são os seguintes:

“Um conhecimento suficientemente preciso sobre o estado da atmosfera no momento inicial.

Um conhecimento suficientemente preciso das leis segundo o qual um estado da atmosfera se desenvolve a partir de outro.”

Entre 1916 e 1922, o matemático inglês Lewis Fry Richardson tentou resolver as equações de previsão do tempo por métodos numéricos e desenvolveu durante alguns meses um projeto de previsão de tempo de seis horas para uma área perto de Munique, Alemanha que se provou um pouco irrealista. No ano de 1922 ele publicou um trabalho visionário *Weather Prediction by Numerical Process*. Já nessa altura Richardson sonhava com uma fábrica de previsão meteorológica recheada de pessoas a fazer cálculos sob o controlo de um supervisor (ver Figura 3.1) [24].

Em 1928, os matemáticos alemães Courant, Friedrichs e Lewy estudaram sistematicamente como resolver as equações das derivadas parciais usando diferenças finitas e limitações específicas a cumprir quando a execução da discretização [25].

Em 1939, o meteorologista sueco Carl Gustav Rossby mostrou que as equações de conservação de vorticidade absoluta fornecem uma correta interpretação do deslocamento que é observado nos centros meteorológicos [26].

No ano de 1946, o primeiro computador eletrónico, o ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer), foi instalado na universidade da Pensilvânia, na Filadélfia, enquanto o matemático húngaro John Von Neumann também trabalhava no melhoramento das máquinas no instituto de Princeton.

Dois anos depois, o meteorologista americano Jule Gregory Charney propôs a simplificação dos sistemas gerais de equações, conhecido como a aproximação quase-geostrófica [26].



FIGURA 3.1 - A FÁBRICA DE PREVISÃO METEOROLÓGICA QUE RICHARDSON SONHAVA (IMPRESSÃO ARTÍSTICA DE F. SCHUITEN, 2000), [27].

Finalmente, em 1950 Jule Charney, o meteorologista norueguês Ragnar Fjörtoft e John Von Neumann efetuaram a primeira PNT [28]. Eles usaram as equações de conservação absoluta de vorticidade para esta experiência e efetuaram os cálculos no ENIAC em Aberdeen, Maryland. Os resultados obtidos para a previsão e a experiência marcou o ponto de partida da previsão numérica moderna [28].

O sucesso das experiências destes três cientistas levou ao desenvolvimento para fins operacionais de um grande aumento do número de complexos modelos de previsão e com boa resolução espacial, permitindo escalas cada vez menores a serem cobertas.

Com o desenvolvimento da tecnologia ao longo dos anos, especialmente computadores e satélites meteorológicos, e uma maior disponibilidade de dados fornecidos por centros de observação meteorológica, foram impulsionadoras de melhorias nas previsões meteorológicas do tempo. Ao longo dos últimos quarenta anos, os sensores de medição dos satélites tiveram grandes avanços permitindo fornecer dados para o cálculo da temperatura da atmosfera, perfis de humidade e outras variáveis ambientais [29]. Com esta evolução foi possível desenvolver modelos atmosféricos que incluem processos físicos das equações do movimento em simulações numéricas da atmosfera e aumentar o número de níveis verticais e horizontais de resolução dos modelos [30].

O modelo hemisférico de 3 camadas foi introduzido em 1962 e o de 6 camadas em 1966. Um maior número de camadas permitia previsões mais precisas de dados de ventos, temperatura e resultante numa melhor previsão do movimento de uma tempestade [31].

Todos estes avanços permitiram chegar aos vários modelos de previsão numérica que atualmente existem e este trabalho foca-se no modelo de escala global de PNT do ECMWF.

3.2 Modelos de PNT

Previsões de radiação e de energia fotovoltaica para o dia seguinte para o mercado energético, é provavelmente uma das aplicações mais importantes atualmente para o desenvolvimento de centrais solares, e são baseados em modelos de PNT. Estes modelos são operados pelos serviços meteorológicos para prever os estados da atmosfera para vários dias à frente. As dinâmicas da atmosfera, isto é, as alterações temporais das condições atmosféricas, são modeladas numericamente através das resoluções das equações diferenciais básicas que descrevem as leis físicas que regem o estado do tempo. Esta modelação é essencial para qualquer previsão com mais de algumas horas.

Vários métodos de previsão da radiação solar têm sido desenvolvidos para prever com precisão a radiação solar global horizontal à superfície. Em geral, os métodos de previsão da radiação solar podem ser caracterizados pelas suas escalas temporais e espaciais segundo a Figura 3.2 [32].

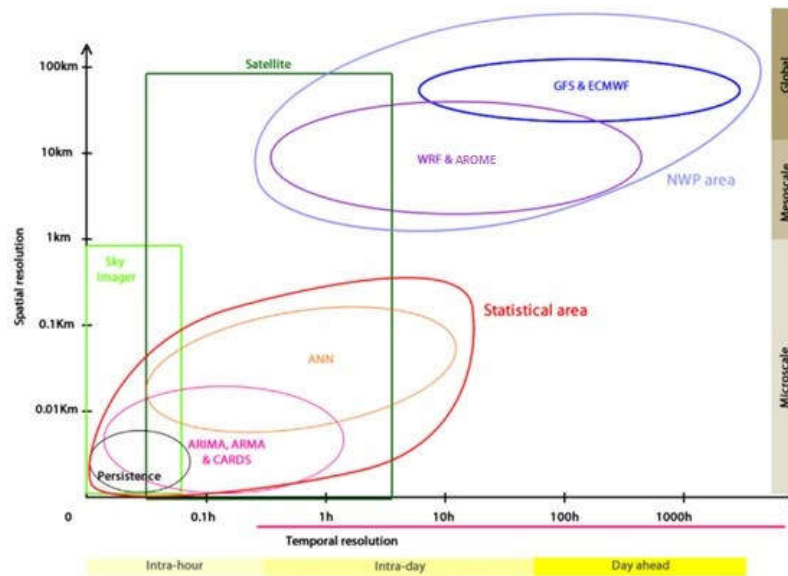


FIGURA 3.2 - MODELO DE CLASSIFICAÇÃO BASEADO NA RESOLUÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL, [32].

Através dos modelos de PNT, primeiramente é calculado o estado futuro da atmosfera. São aplicadas ferramentas de assimilação de dados para iniciar as previsões, e fazer o uso de observações e medições meteorológicas a nível mundial como dados de observações de estações meteorológicas, boias e satélites. As equações de prognóstico são então resolvidas usando métodos numéricos que envolve equações de ordem temporal e espacial. Atualmente a resolução espacial dos modelos globais de PNT está na faixa dos 10-50 km, enquanto que a resolução temporal é de 1,3 ou 6 horas. Os modelos globais de PNT são atualmente geridos por quinze serviços meteorológicos tais como o Global Forecast System (GFS), a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e o Integrated Forecasting System (IFS) operado pelo ECMWF [32]

Como segundo passo, as resoluções espaciais e temporais das previsões meteorológicas podem ser determinadas pela aplicação de um modelo de mesoscala cobrindo apenas uma parte da Terra e tomando as condições de contorno iniciais e laterais a partir de um modelo de PNT global. Resolvendo as equações de governação numa malha mais fina torna os modelos de mesoscala capazes de resolver fenómenos atmosféricos menores tais como brisas marítimas, trovoadas e campos de vento forçados topograficamente. Em particular, as dinâmicas espaciais e temporais da radiação solar à superfície são fortemente influenciadas por características de pequena escala como campos de nuvens e características de superfície

heterogéneas, o que torna potencialmente vantajoso a aplicação de modelos mesoscala para a previsão de radiação solar.

3.3 Previsão da radiação solar

A introdução no mercado da energia solar está em rápido crescimento e este crescimento impõe desafios às operações das redes elétricas de energia [33], que precisam de ser equilibradas em tempo real [34].

A radiação ao nível do solo é altamente variável devido aos processos atmosféricos, especialmente à cobertura das nuvens e ao conteúdo dos aerossóis. A variabilidade da radiação ao nível do solo afeta a fiabilidade de geração de energia [35], o que por sua vez compromete a estabilidade e os custos de integração para redes solares de alta concentração [36]. A precisão da radiação solar e as previsões de energia permitem a estas tecnologias de concentração solar mitigar a incerteza da energia solar e otimizar as soluções de procura e de armazenamento [37]. Desta forma previsões de produção energia solar fiáveis são um fator importante para uma integração eficiente de grandes quantidades de energia solar no sistema de fornecimento de energia elétrica.

Nos dias de hoje, os sistemas de previsão de energia solar são uma parte essencial da rede e dos sistemas de controlo em países com um substancial de geração de energia solar. Por exemplo, na Alemanha com uma potência instalada em energia fotovoltaica de 32 GW_{pico} no final de 2012, cobriu 5% da energia total consumida. Em dias de verão com céu limpo, a energia fotovoltaica pode contribuir com 42% da procura em eletricidade durante o durante picos de carga ao meio dia (ver Figura 3.3) [38].

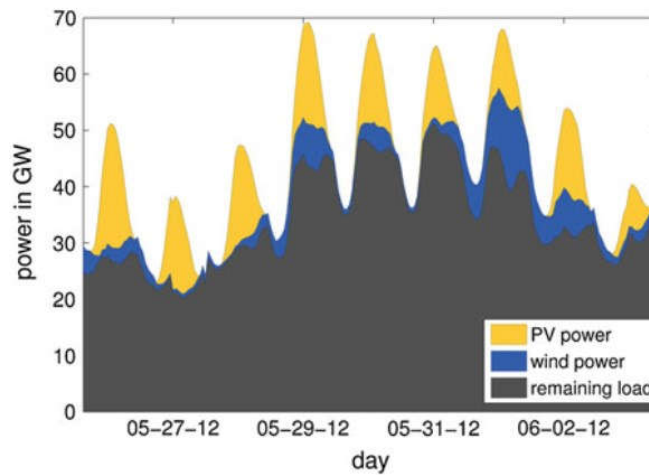


FIGURA 3.3 - CONTRIBUIÇÃO DA ENERGIA SOLAR E DO VENTO PARA O TOTAL DE ENERGIA FORNECIDA NA ALEMANHA PARA 26.5-3.6.2012, [39].

Vários sistemas para a previsão da energia fotovoltaica foram introduzidos recentemente, a maior parte deles consistem nos elementos ilustrados na Figura 3.4. Todos os passos de modelação podem envolver processos físicos, estatísticos ou ambos.

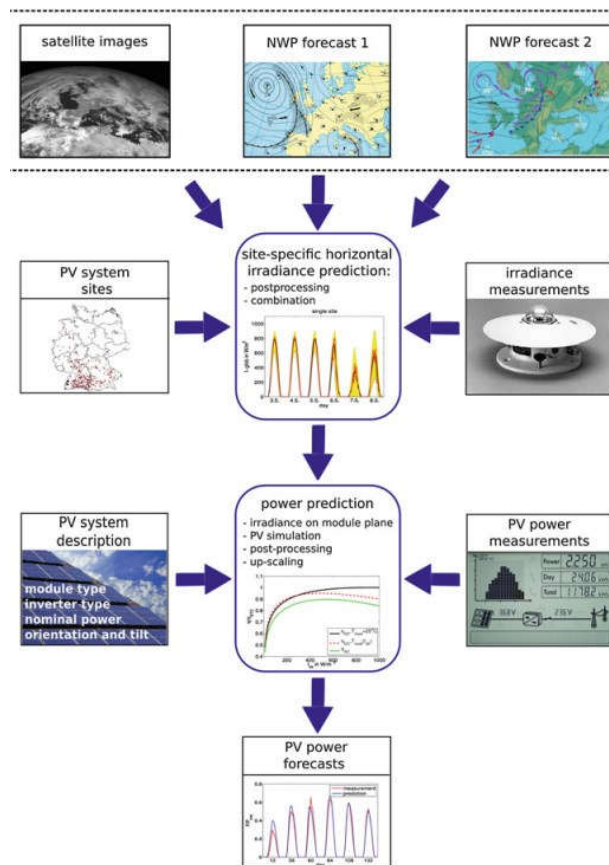


FIGURA 3.4 - VISÃO GERAL DAS ETAPAS BÁSICAS NA MODELAÇÃO DA PREVISÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA, [39].

A previsão de radiação solar à superfície é o primeiro e mais essencial passo na maioria dos sistemas de previsão de energia fotovoltaica. Dependendo da aplicação e dos requisitos correspondentes em relação ao horizonte de previsão e da resolução espacial e temporal, diferentes modelos são utilizados. Os modelos de PNT são aplicados para obter previsões de vários dias à frente. As previsões de radiação a curto prazo podem ser obtidas pela detecção e extrapolação do movimento das nuvens, baseados em imagens de satélite para previsões de várias horas à frente e em fotografias do céu tiradas no solo para previsões horárias com uma grande resolução espacial e temporal. A medição de dados da radiação solar são outra valiosa fonte de dados para previsões a curto prazo no intervalo de minutos a horas. Além disso, os dados medidos são necessários para qualquer procedimento pós-processamento estatístico, aplicado para otimizar previsões com um modelo físico para um determinado local [31].

Para obter previsões de energia fotovoltaica a partir das previsões da radiação solar global horizontal é possível recorrer à modelação física, que envolve a conversão da radiação a partir do ângulo horizontal para o ângulo de inclinação do módulo, seguido de um modelo de simulação de energia solar fotovoltaica. Neste modelo, as características da configuração do sistema fotovoltaico são necessárias para além dos dados meteorológicos, inclinação e orientação do sistema fotovoltaico bem como uma caracterização da eficiência do módulo com dependência da radiação e temperatura. Alternativamente, a relação entre a energia fotovoltaica e previsões de radiação e outras variáveis de entrada podem ser estabelecidas com base em dados históricos de medições de energia fotovoltaica com aproximações estatísticas ou de aprendizagem. Na prática, muitas vezes ambas as abordagens são combinadas e o processamento pós estatístico usando dados de medições de energia fotovoltaica é aplicado para melhorar as previsões de um modelo físico [31].

A previsão da energia fotovoltaica para aplicações úteis normalmente requer previsões da geração de energia fotovoltaica cumulativa para uma área específica, isto é, previsão regional, em vez de previsões para um único sítio. Estas previsões regionais são tipicamente obtidas a partir da produção de energia fotovoltaica prevista a partir de um conjunto representativo de sistemas fotovoltaicos.

3.4 Centro Europeu de Previsão do Tempo de Médio Prazo (ECMWF)

O Centro Europeu de Previsão do Tempo de Médio Prazo é uma organização intergovernamental independente suportada por trinta e quatro estados. O centro é um instituto de pesquisa e de serviço operacional constante, produzindo e divulgando previsões numéricas do tempo para os estados membros e oferece um catálogo de previsões de dados que podem ser compradas por empresas por todo o mundo e outros clientes comerciais [40].

A organização foi estabelecida em 1975, com o propósito de impulsionar os recursos meteorológicos europeus de forma a produzir dados climáticos precisos e previsões de médio alcance. O projeto foi criado pelo COST (Cooperação Europeia na Ciência e Tecnologia), que apoiou a cooperação entre cientista e técnicos Europeus.

A primeira previsão a médio prazo foi efetuada em junho de 1979 e o ECMWF tem produzido previsões meteorológicas de médio prazo desde 1 de agosto de 1979, inicialmente com previsões a cinco dias, mas a partir do dia 1 de agosto de 1980 foram feitas previsões a sete dias. As primeiras previsões conjuntas com países membros, produzidas como parte do sistema de previsão operacional, foram realizadas a 24 de novembro de 1992 [40].

Os estados membros estão representados no Conselho do ECWMF, o órgão de governo da organização e são vinte e dois países. Portugal pertence à organização tal como a Alemanha, Áustria, Bélgica, Croácia, Dinamarca, Finlândia, França, Grécia, Espanha, Islândia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Holanda, Noruega, Sérvia, Eslovénia, Suécia, Suíça, Turquia e Reino Unido [40]

Em 2005 houve alterações na convenção que permitiram a entrada de novos estados membros e com novas emendas a 6 junho 2010. Estes novos estados membros são designados de estados de cooperação e fazem parte a Bulgária, República Checa, Estónia, Macedónia, Hungria, Israel, Letónia, Lituânia, Montenegro, Marrocos, Roménia e Eslováquia [40].

Os estados membros e os estados cooperantes recebem dados das previsões numéricas do ECMWF em tempo real para prepararem as previsões para os utilizadores finais. Podem ter acesso a instalações básicas de computação do

ECMWF, ao arquivo meteorológico, a armazenamento temporário e a supercomputadores.

O centro ECMWF tem como objetivos nucleares [41]:

- Produzir previsões numéricas do tempo e monitorizar o sistema Terra;
- Realizar investigações científicas e técnicas para melhorar as técnicas de previsão;
- Manutenção do arquivo dos dados meteorológicos.

De modo a cumprir estes objetivos, o centro fornece:

- Previsões numéricas globais do tempo duas vezes ao dia;
- Análise da qualidade do ar;
- Monitorização da composição atmosférica;
- Monitorização do clima;
- Análise da circulação oceânica;
- Previsão hidrológica.

3.5 Modelo de radiação do ECMWF

O modelo do ECMWF é um modelo de previsão global usado em PNTs. Para a previsão da radiação solar o modelo utiliza o modelo de radiação “Mcrad”, desenvolvido por Jean-Jacques Morcrette [42]. A radiação de onda-curta do Mcrad é baseada no Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) [43]. Os constituintes presentes no modelo Mcrad são o vapor de água, dióxido de carbono, ozono, metano, óxido nítrico, aerossóis e vários clorofluorcarbonos. O albedo e a profundidade óptica são parametrizados através do percurso da água que vai sendo condensada (considerando líquido, gelo, e mistura de fase das nuvens) e o raio efetivo das gotas das nuvens [44]. O raio efetivo das nuvens líquidas é calculado através do modelo desenvolvido por Martin et al. (1994) e a dimensão efetiva da partícula de gelo por Zhian Sun [45, 46]. As propriedades ópticas das nuvens de gelo são baseadas no estudo de Fu (1996) e de radiação de pequeno comprimento de onda, investigação realizada por Fu et al. (1998) [47, 48]. A formulação das nuvens de água tem como base o estudo de radiação de pequeno comprimento de onda de Anthony Slingo em 1989 e para longo comprimento de onda o estudo desenvolvido por Lindner e Li (2000) [49, 50]. A partir das propriedades radiativas, o método de adição de dois fluxos é

usado para resolver o modelo radiativo a cada nível, resultando em radiação global à superfície (GHI). O esquema de radiação tem intervalos horários com interpolação a cada 30 minutos com base nas transmissividades de pequeno comprimento de onda calculadas a tempo inteiro e o cosseno do ângulo solar zenital.

Embora o modelo produza um grande número de variáveis meteorológicas, foi considerado apenas o DNI para este estudo. A variável radiativa DNI é calculada como energia acumulada em intervalos horários.

As nuvens são provavelmente o fator mais importante na determinação da radiação solar. Portanto é útil fornecer informação detalhada adicional sobre as diferenças entre os dois modelos de previsão de nuvens, o 36R1 e o 38R1. O modelo 36R1 usa o esquema de nuvens desenvolvido por Tiedtke em 1993, que ao longo dos anos foi sofrendo alterações de Jakob em 2010 (modificação na sedimentação do gelo), no mesmo ano por Jakob e Klein que alteraram a representação da precipitação em sub-escala e em 2007 Tompkins et al. melhorou o modelo com alterações nas condições do gelo supersaturado presente nas nuvens [51, 52, 53, 54]. Este esquema de nuvens tem apenas duas variáveis de prognóstico, água das nuvens e fração das nuvens, e um diagnóstico da precipitação de chuva e neve. O modelo 38R1 usa uma versão melhorada do esquema de nuvens proposto em 2011 por Forbes et al. [55]. Nesta versão, as nuvens têm cinco variáveis de prognóstico: água líquida das nuvens, gelo nas nuvens, nebulosidade, chuva e neve. Com o novo esquema de nuvens e precipitação, o montante hidrológico geral de uma coluna difere do esquema referido anteriormente. Os principais coconstituintes presentes na atmosfera que afetam a radiação solar superficial são as nuvens e a coluna total de vapor de água, que são ambos afetados pela mudança nas nuvens de precipitação.

Em termos de aerossóis, potencialmente um fator importante na computação da radiação, ambas as versões dos modelos usam a mesma climatologia, este utiliza o modelo desenvolvido no estudo de Tegen et al (1997) e adaptado a partir do modelo do ECMWF numa investigação em 2005 realizada por Tompkins [54, 56]. Esta climatologia descreve o ciclo anual da distribuição de cinco tipos de aerossóis – sais marinhos, poeiras do deserto, carbono orgânico e preto e sulfato de aerossóis – sendo descrito no modelo como a distribuição geográfica da média mensal da espessura óptica total para cada tipo de aerossol. Valores diários são obtidos pela interpolação

das médias mensais adjacentes. A variação vertical da espessura ótica dos aerossóis é obtida aplicando alturas de 1 km para carbono preto, e 3 km para outros tipos de aerossóis. Fornecendo a média mensal da composição dos aerossóis, erros no dia a dia da espessura ótica dos aerossóis são suscetíveis de traduzirem erros na radiação solar à superfície. Assim é provável que uma descrição melhorada aerossol melhore a radiação solar no solo. Atualmente, a descrição dos aerossóis está sendo melhorada pelo projeto *Monitoring Atmospheric Composition and Climate* que trabalha em parceria com o modelo de operação do ECMWF [57].

4. Recolha e tratamento de dados

4.1 Dados ECMWF

Os dados recolhidos através da base de dados do ECMWF foram obtidos através da licença do Instituto de Ciências da Terra da Universidade de Évora para a região de Évora. Foram utilizados dados de 1 de abril de 2016 a 31 de março de 2017, perfazendo um ano de dados de radiação solar direta num plano horizontal. Os dados recolhidos estavam em formato *NetCDF* (Network Common Data Form), este tipo de ficheiro é muito comum na meteorologia como uma padronização para a representação de informações. Estes são portáteis e auto-descritivos e podem ser acedidos de forma direta sem a necessidade de ler todo o conjunto de dados. Os dados foram convertidos para ficheiros *xlsx* e analisados através do *software* Microsoft Excel. Primeiramente os dados foram multiplicados pelo cosseno do ângulo zenital para obtermos o DNI. Os dados têm unidades em J/m^2 e são dados horários acumulados ao longo da previsão, sendo necessário efetuar uma subtração ao valor previsto anteriormente e apresentam um passo de tempo de 1 a 72 horas, perfazendo três dias de previsão. Os valores são posteriormente convertidos para W/m^2 e são realizadas médias horárias mensais. O ficheiro recolhido apresenta as variáveis presentes na Tabela 2:

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DOS DADOS DO ECMWF RECOLHIDOS

Nome	Sigla ECMWF	Unidade	Observações
Data	date	Início: 1990-01-01 às 00:00:00	N.A.
Intervalo de tempo	step	h	Valores entre 1 a 90 horas
Latitude	latitude	° Norte	Valor de 38,5
Longitude	longitude	° Este	Valor de 352
Radiação direta à superfície	fdir	J/m ²	Valores acumulados ao longo da previsão

Como a latitude e a longitude variam ao longo da grelha para a região de Évora, estas duas variáveis foram predefinidas. Assim foram escolhidos valores intermédios tanto para a latitude como a longitude, sendo escolhida como latitude o valor de 38,5°N e de longitude 352°O.

Os fluxos de radiação arquivados podem ser descendentes ou líquidos. A energia que entra no sistema da superfície atmosférica da Terra é positiva, e portanto, fluxos descendentes são positivos e fluxos líquidos referem-se à diferença entre os fluxos descendentes e ascendentes. Para obter o fluxo ascendente (F^{up}) a partir do fluxo descendente (F^{dn}) e o fluxo líquido (F^{net}), usa-se a expressão $F^{up} = F^{dn} - F^{net}$.

Os fluxos físicos são calculados pelo modelo do ECMWF e são acumulados desde o início da previsão, e as unidades são em J/m². A média diária, em W/m² é obtida obtendo os fluxos acumulados a $t_1 = t$ e $t_2 = t + 24 \text{ horas}$, onde t é o tempo de início da média, tomando a diferença e dividindo por 86400, o número de segundos num dia.

As quantidades de céu limpo são calculadas exatamente para as mesmas condições de temperatura, humidade, ozono, vestígios de gases e aerossóis, mas assumindo que não existem nuvens.

Radiação solar de pequeno comprimento de onda refere-se à radiação emitida pelo Sol, depois dispersada, absorvida ou transmitida pela atmosfera e refletida ou absorvida pela superfície. Isto corresponde a aproximadamente 0.2-4 μm ou 50000-2600 cm^{-1} da parte do espectro solar. Radiação térmica, terrestre ou grade

comprimento de onda refere-se à radiação emitida e absorvida pela superfície ou por gases, nuvens e partículas dentro da atmosfera e corresponde a aproximadamente 4-100 μm ou 50000-2600-10 cm^{-1} da parte do espectro solar.

De forma a explicar os fluxos acumulados à superfície e no topo da atmosfera estes são arquivados e a Figura 28 retrata a energia radiativa que flui na atmosfera. Os campos disponíveis no topo da atmosfera (TOA) correspondem a 0 hPa de nível pressão.

Frequentemente a quantidade requerida a partir de modelos globais tem o nome de radiação de grande comprimento de onda emitida para o espaço (OLR) que representa a radiação que sai do planeta sob a forma de radiação infravermelha e está representado na Figura 4.1 por $L_{\text{TOA}}^{\text{up}}$. O modelo do ECMWF assume que não existe nenhuma radiação no topo da atmosfera recebida de qualquer outra fonte que não o sol, i.e., $L_{\text{TOA}}^{\text{dn}} = 0$ (isso rejeita o fundo cósmico de micro-ondas de 2,73 K, o que equivale apenas 3 $\mu\text{W}/\text{m}^2$).

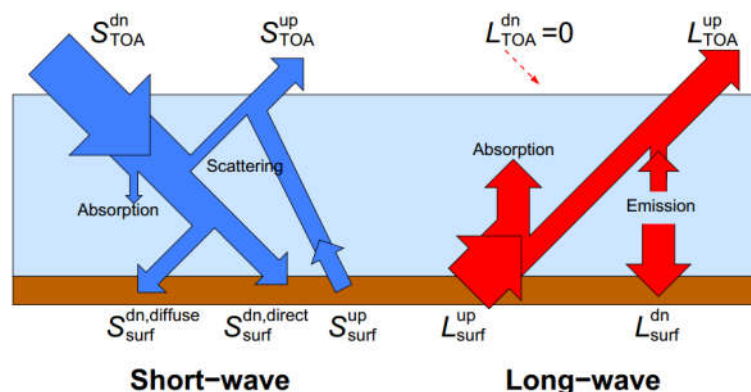


FIGURA 4.1 - ESQUEMA DA ENERGIA RADIATIVA DE PEQUENO COMPRIMENTO DE ONDA E DE LONGO COMPRIMENTO DE ONDA QUE FLUI NA ATMOSFERA. OS FLUXOS ASCENDENTES E DESCENDENTES NO TOPO DA ATMOSFERA E NA SUPERFÍCIE, [58].

A Figura 4.2 mostra um exemplo de um mapa global da Terra com a previsão de DNI para as primeiras 24 horas do início da previsão para o dia 15-02-2015 previsto pelo modelo de radiação do ECMWF.

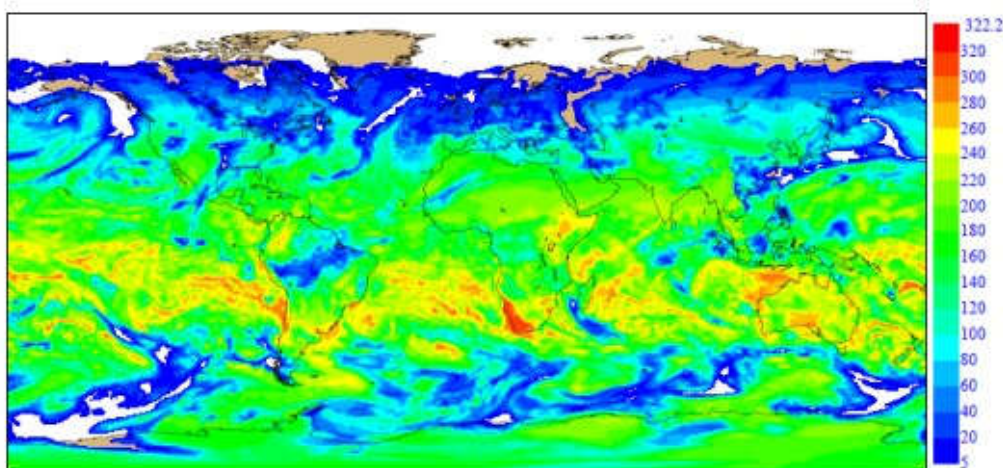


FIGURA 4.2 - RADIAÇÃO SOLAR DIRETA TOTAL À SUPERFÍCIE (FDIR) NAS PRIMEIRAS 24 HORAS DO INÍCIO DA PREVISÃO EM 15-02-2015 (W/m²), [54].

4.2 Dados observados no Colégio Luís António Verney

Os dados foram obtidos através do *suntracker* instalado no Instituto de Ciências da Terra que se encontra no polo Colégio Luís António Verney da Universidade de Évora através de uma plataforma desenvolvida pelo instituto para a recolha de dados das várias instalações meteorológicas instaladas pelo país (ver Figura 4.3). Os dados são recolhidos através de uma plataforma desenvolvida pelo instituto para a recolha de dados das várias instalações meteorológicas instaladas pelo país. Neste trabalho utilizam-se dados recolhidos de abril de 2016 a março de 2017 correspondentes a valores médios da radiação solar direta e radiação solar difusa num plano perpendicular, ao minuto com o fuso horário em UTC, valores com unidades em W/m².

A Tabela 4 apresenta as características do local de medição:

TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DO LOCAL DE MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NO ICT

Variável	Évora
Latitude	38°34'04.1"N
Longitude	7°54'41.3"W
Altitude	290m

A variável selecionada na plataforma do CGE foi a *rsdir_avg* (radiação solar direta média).

Os equipamentos de medição instalados no *suntracker* são um pireliómetro da marca *Kipp & Zonen* modelo CHP1 e por um piranómetro CMP3 da mesma marca.



FIGURA 4.3 - LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO INSTITUTO DE CIÊNCIAS DA TERRA DA UNIVERSIDADE DE ÉVORA

5. Comparação das observações com as previsões

5.1. Metodologia

Para realizar a comparação das observações com as previsões para o primeiro dia (0-24 horas), para o segundo dia (24-48 horas) e para o terceiro dia (48-72 horas) para a previsão de DNI foi efetuada uma comparação de modo a avaliar a qualidade da previsão, entre a radiação medida e a radiação prevista. Foi escolhido um período, quer para a comparação dos dados observados e previstos quer para a análise estatística, entre as 8 horas e as 18 horas de modo a permitir um tratamento mais fácil e livre do período noturno onde não a presença de radiação solar.

Ao longo do tempo várias métricas têm sido propostas e usadas para quantificar a fiabilidade das previsões solares. As performances das métricas convencionais podem ser categorizadas por três tipos de erros de previsão:

- Viés;
- Variância;
- Correlação.

Para que seja feita uma comparação entre os dados medidos e dos dados previstos, com a finalidade de identificar o grau de proximidade entre valores de ambas, foi realizada uma análise estatística de erros. Assim para efetuar a análise foram utilizadas as seguintes métricas estatísticas que são apresentadas de seguida:

5.1.1 Erro relativo em percentagem (E)

$$E = \left(\frac{c_i - m_i}{m_i} \right) \times 100 \quad (5.1)$$

A Equação (5.1) indica o erro relativo em percentagem. Onde c_i é o valor previsto e m_i é o valor medido. O resultado E indica o desvio entre o valor calculado e o valor medido em percentagem. O valor ideal de E é igual a zero [59].

5.1.2 Tendência do erro médio (MBE)

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_i - m_i) \quad (5.2)$$

A Equação (5.2) representa a tendência do erro médio que fornece informação do desempenho da correlação a longo prazo, permitindo a comparação do desvio real entre os valores calculados e os medidos. Valores positivos de MBE indicam uma predisposição do modelo em sobrestimar os dados previstos e valores negativos indica que o modelo subestima os dados previstos. O seu valor ideal é zero [59].

5.1.3 Erro percentual absoluto médio (MAPE)

$$\text{MAPE} = \text{ABS} \left(\frac{\sum_{i=1}^n E}{n} \right) \quad (5.3)$$

O valor absoluto do erro médio é obtido através da Equação (5.3) expresso como a valor médio absoluto do desvio entre os valores medidos e os estimados da radiação solar. Este expressa a exatidão do erro em percentagem [59].

5.1.4 Raiz quadrada do erro médio (RMSE)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_i - m_i)^2} \quad (5.4)$$

A Equação (5.4) expressa o RMSE que se traduz na raiz quadrada do erro médio e fornece informações sobre o desempenho da correlação a curto prazo [59]. Este faculta uma estimativa dos desvios absolutos médios entre os dados medidos e os previstos. O seu valor é sempre positivo, tendo como valor ideal zero.

Nas métricas estatísticas apresentadas, c_i representa os valores medidos e m_i os valores previstos e n o número de medições. As variáveis MBE e RMSE ambas representadas nas Equações (5.2) e (5.4), possuem a unidade de medida de acordo com a série temporal em estudo, ou seja, em W/m^2 .

5.1.5 Coeficiente de correlação

Um método mais preciso para calcular o tipo e a força e direção de uma relação linear entre duas variáveis é calculando o coeficiente de correlação. O símbolo r representa o coeficiente de correlação da amostra, também conhecido pelo coeficiente de correlação de Pearson. O coeficiente de correlação é dado pela Equação (5.5) [60]:

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2}} \quad (5.5)$$

Onde n é o número de medições.

A partir da Tabela 4 é possível descrever o tipo de correlação para cada resultado apresentado.

TABELA 4 - INTERPRETAÇÃO DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO, [57].

Valor de ρ (+ ou -)	Interpretação
0.00 a 0.19	Uma correlação bem fraca
0.20 a 0.39	Uma correlação fraca
0.40 a 0.69	Uma correlação moderada
0.70 a 0.89	Uma correlação forte
0.90 a 1.00	Uma correlação muito forte

De seguida são apresentados os gráficos obtidos para cada mês e para as diferentes previsões horárias de DNI e o *scatter plot*, respetivo. O gráfico *scatter plot* permite entender a relação entre as duas variáveis de estudo, a variável de medição e a de previsão. Também são apresentadas as condições atmosféricas presentes em cada mês, como a nebulosidade, a espessura ótica dos aerossóis e o vapor de água presentes na atmosfera. As informações foram recolhidas *online* através do centro da NASA conhecido por Earth Observations [61]. As imagens de superfície e de nebulosidade são baseadas no *VIIRS True Color* e no *MODIS True Color*, enquanto a informação da espessura ótica dos aerossóis e de vapor de água são fornecidos pelo *AQUA/MODIS* [55]. Dados de ozono não foram recolhidos devido à intermitência de dados disponíveis na plataforma da NASA.

Com os seguintes gráficos pode-se observar as previsões de DNI para os diferentes para o primeiro, segundo e terceiro dia desde abril de 2016 a março de 2017:

5.2. Gráficos do DNI para os três dias de previsão

5.2.1 Abril

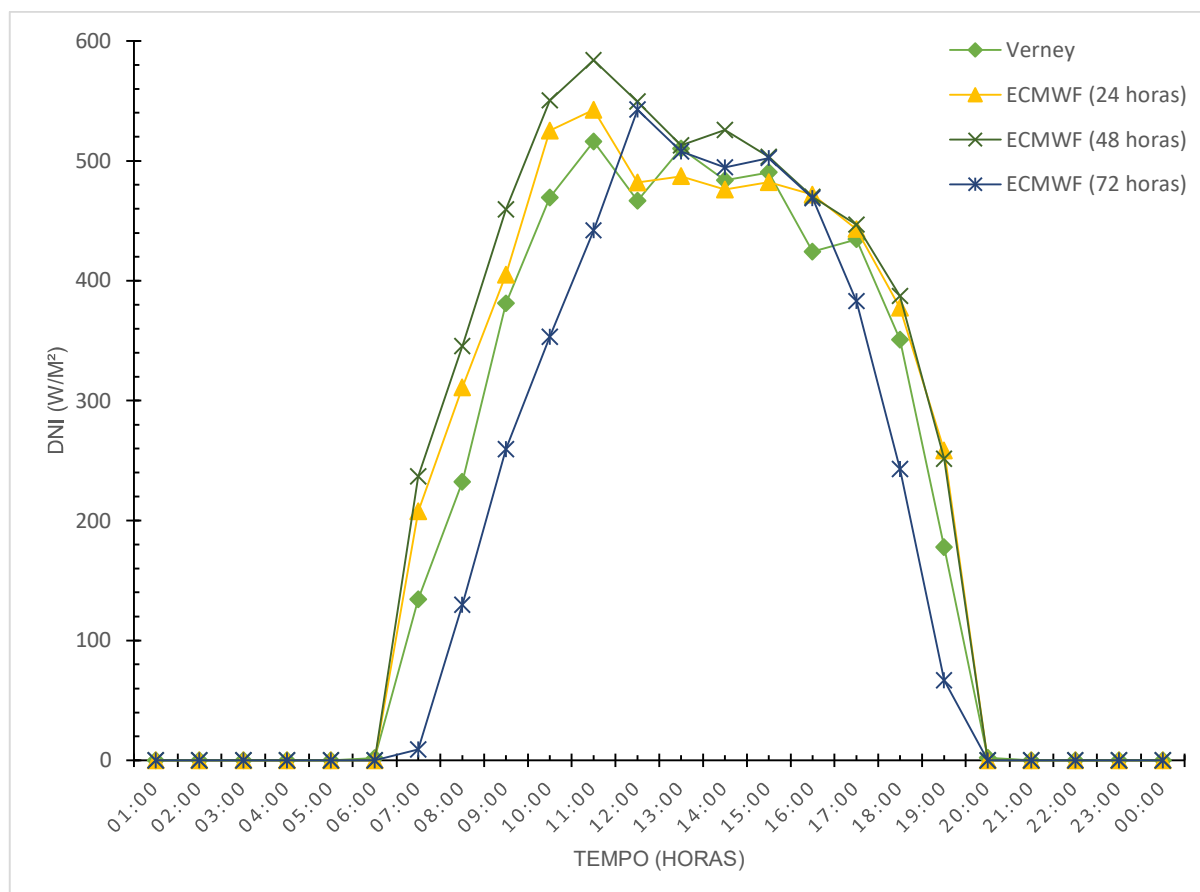


FIGURA 5.1 - CICLO DIÁRIO MÉDIO DO DNI PARA O MÊS DE ABRIL

A partir da Figura 5.1 verifica-se que o mês de abril foi um mês em que ocorreu alguma instabilidade atmosférica, neste caso, a presença de dezassete dias com céu nublado, que influenciaram as previsões do ECMWF, bem como uma presença elevada de vapor de água em doze dias e seis dias com presença de aerossóis (ver Figura 5.2). No cômputo geral neste mês as previsões para os diferentes períodos horários sofreram uma sobrestimação de DNI estimado pelo modelo do ECWMF e verifica-se que para a previsão a 72 horas. O fato de isso ter acontecido poderá ser explicado pelos baixos valores apresentados de DNI ao nascer e pôr-do-sol para a respectiva previsão de DNI. As previsões médias horárias para as diferentes horas apresentam

resultados diferentes uns dos outros, apenas semelhantes ao início do dia e no final do mesmo (expeto para as 72 horas).

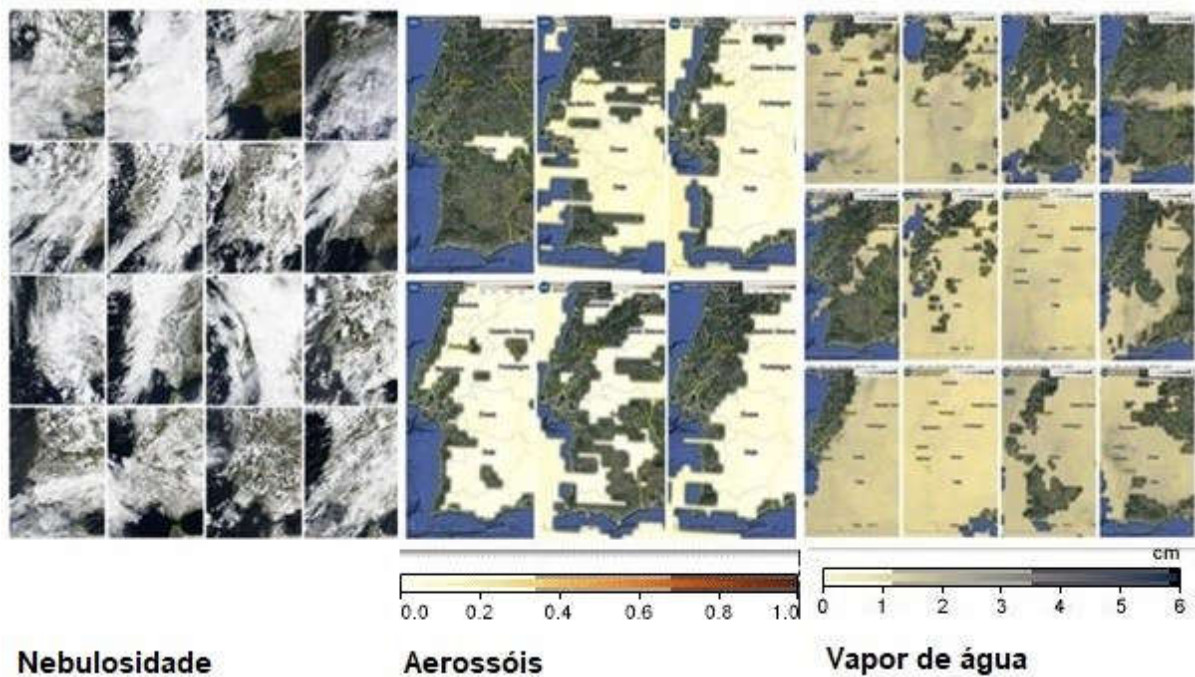


FIGURA 5.2 - NEBULOSIDADE, AERROSSÓIS E VAPOR DE ÁGUA PRESENTES NA ATMOSFERA PARA A REGIÃO DE ÉVORA NO MÊS DE ABRIL DE 2016

Como mostra a Figura 5.3 é possível verificar-se através do *scatter plot* que os valores medidos e previstos pelo modelo de radiação não são muito relacionados, havendo muitos dados dispersos no gráfico que provam que a qualidade da previsão não apresentou bons resultados para o referido mês. Os resultados apresentados são na maioria sobrevalorizados, ocorrendo apenas alguma subestimação para o terceiro dia de previsão (72 horas).

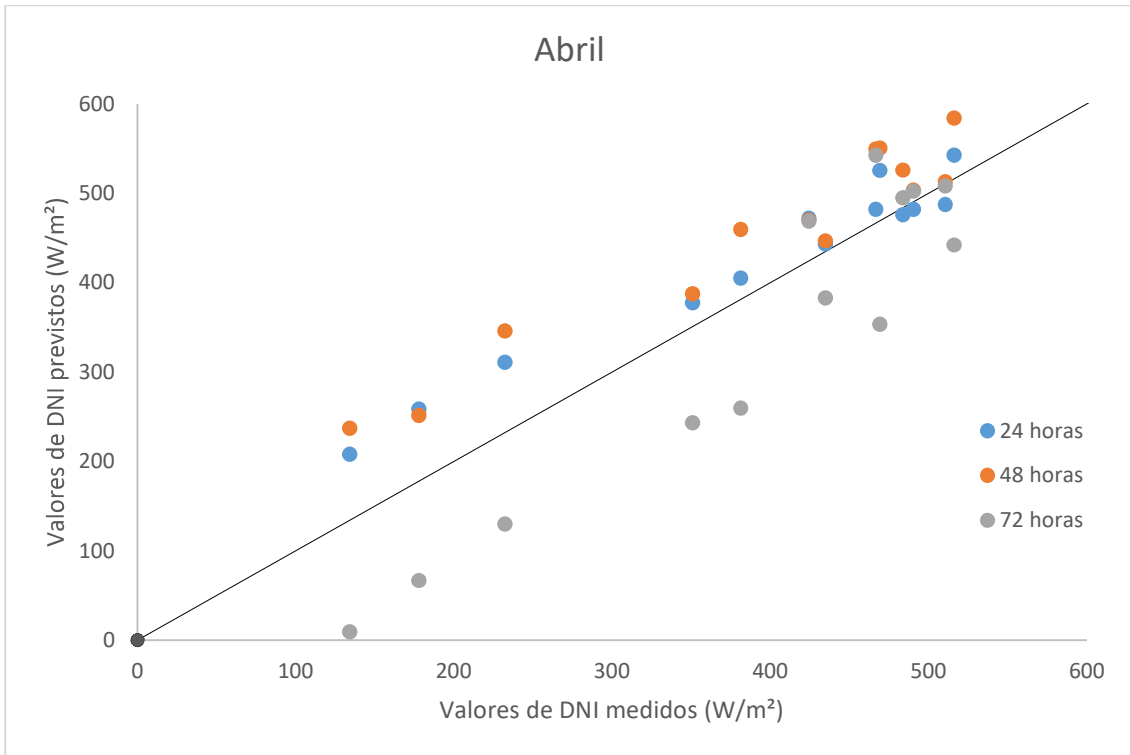


FIGURA 5.3 - SCATTER PLOT DO DNI MEDIDO VS PREVISTO PARA O MÊS DE ABRIL

5.2.2 Maio

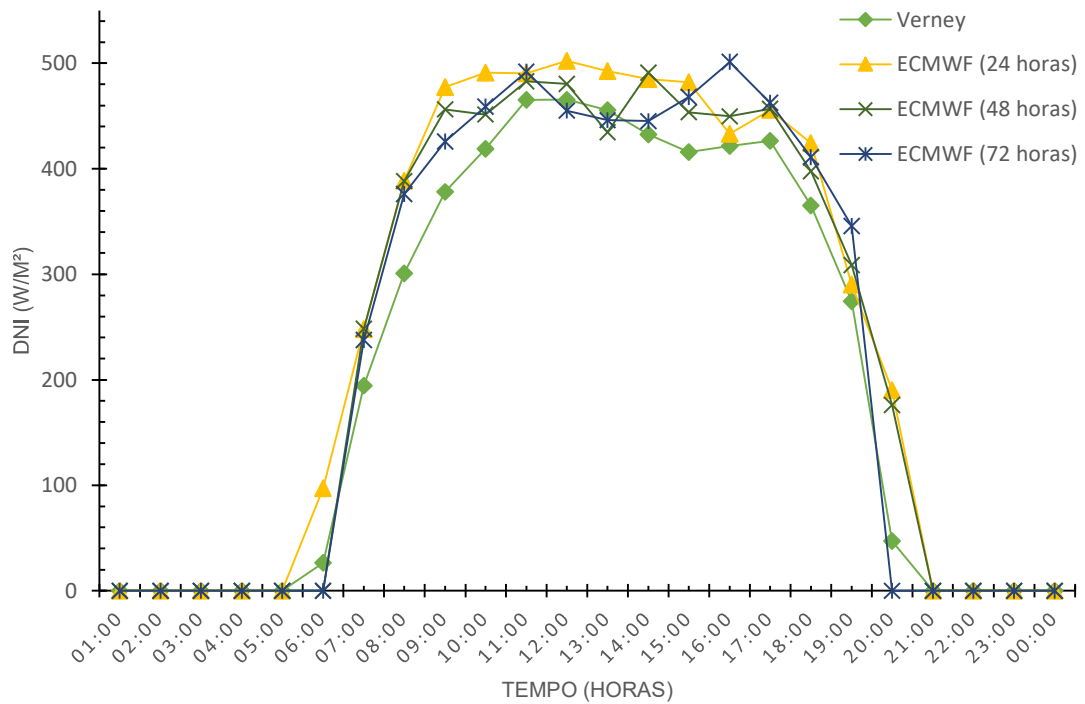


FIGURA 5.4 - CICLO DIÁRIO MÉDIO DO DNI PARA O MÊS DE MAIO

Para o mês de maio verifica-se através da Figura 5.4 a mesma situação do mês de abril, ocorreu uma grande instabilidade atmosférica com a presença em grande número de catorze dias de céu nublado que influenciaram em muito a previsão de DNI pelo ECMWF e o aparecimento de em elevada quantidade de vapor de água em dez dias e de aerossóis em onze (ver Figura 5.5), tendo por consequência da instabilidade verificada a ocorrência de uma sobrestimação da previsão de DNI para as diferentes previsões horárias. A qualidade das diferentes previsões horárias de DNI não apresenta o melhor resultado, ocorrendo diversas flutuações de DNI ao longo do mês nas três previsões horárias, principalmente a meio do dia.

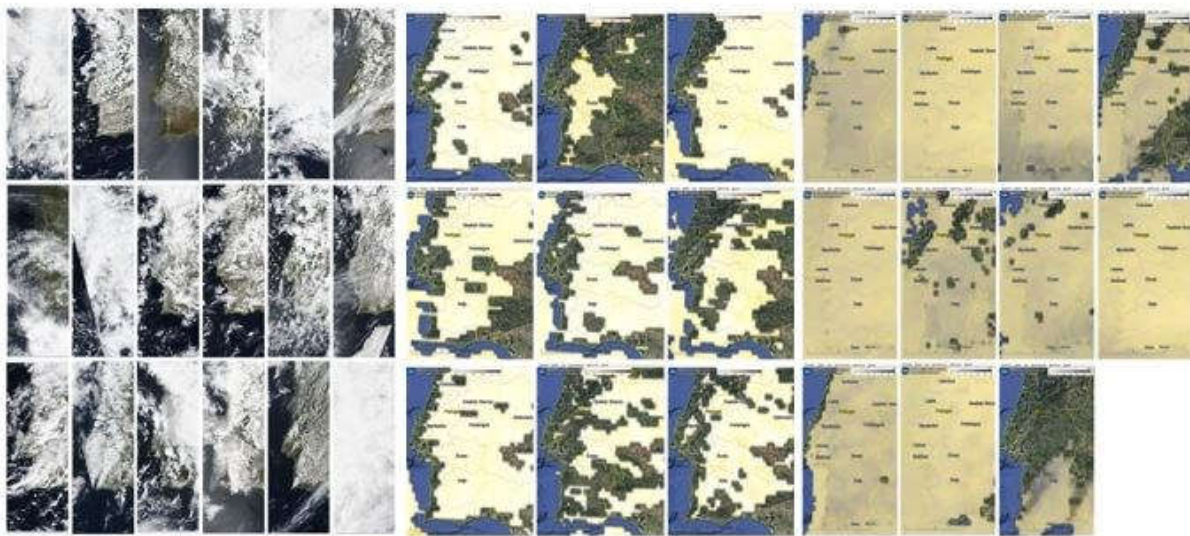


FIGURA 5.5 - NEBULOSIDADE, AEROSSÓIS E VAPOR DE ÁGUA PRESENTES NA ATMOSFERA PARA A REGIÃO DE ÉVORA NO MÊS DE MAIO DE 2016, FIGURA SEMELHANTE À FIGURA 5.2 MAS RESPEITANTE AO MÊS DE MAIO.

O mês de maio apresenta como mostra a Figura 5.6 um resultado semelhante ao mês de abril, como alguns dados dispersos e pouca aproximação da reta linear. A maior parte dos resultados apresenta uma sobrestimação.

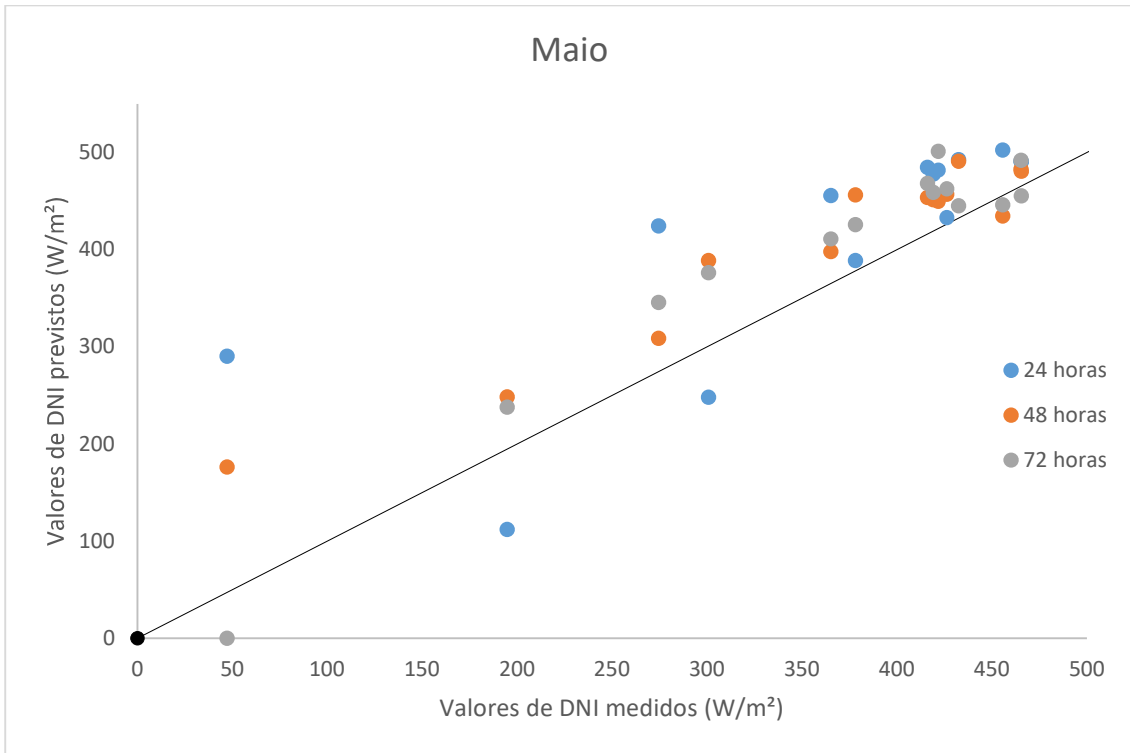


FIGURA 5.6 - SCATTER PLOT DO DNI MEDIDO VS PREVISTO PARA O MÊS DE MAIO

5.2.3 Junho

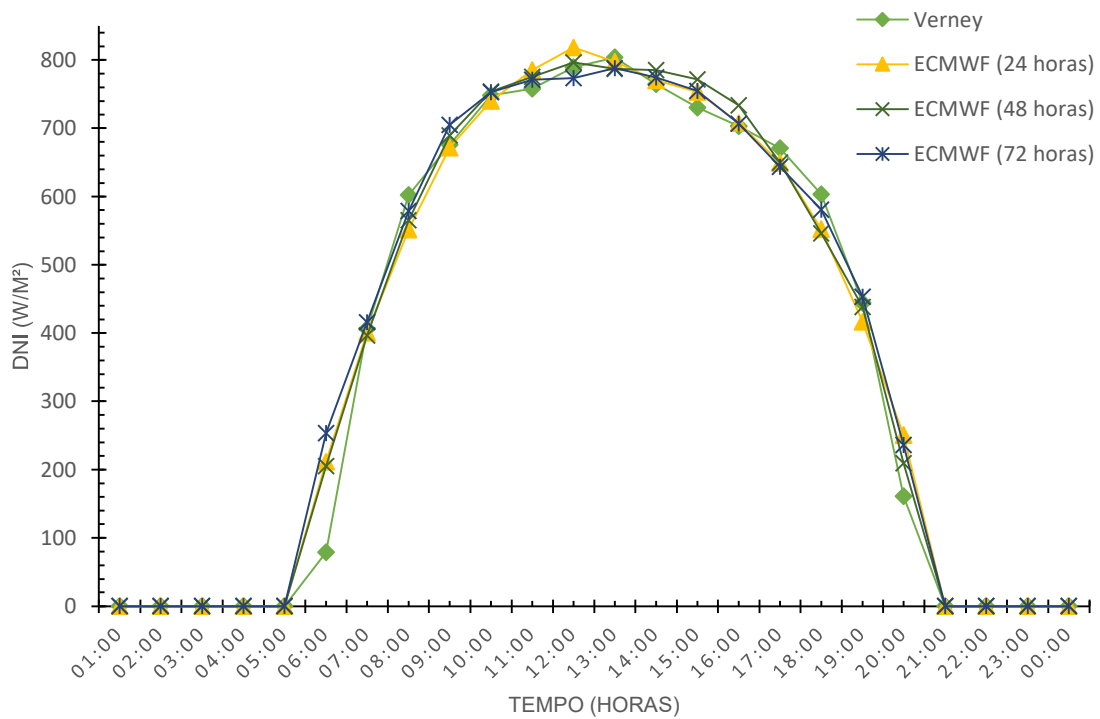


FIGURA 5.7 - CICLO DIÁRIO MÉDIO DO DNI PARA O MÊS DE JUNHO

Para o mês de junho o modelo de previsão de DNI do ECMWF, previu quase na perfeição para as diferentes previsões horárias, apenas com uma pequena sobrestimação ao meio dia solar para as 24 horas de previsão do ECMWF (ver Figura 5.7). Ocorreu a presença, em valores altos, de vapor de água em quinze dias e aerossóis em nove e apenas ocorreram três dias com nebulosidade que pouco tiveram influência nos resultados (ver Figura 5.8). A boa qualidade das previsões é explicada pela escassa presença de nuvens na atmosfera o que possibilita uma melhor previsão de DNI que chega à superfície terrestre. A qualidade da previsão de DNI para as diferentes previsões traduz-se em resultados muito aceitáveis.



FIGURA 5.8 - NEBULOSIDADE, AEROSSÓIS E VAPOR DE ÁGUA PRESENTES NA ATMOSFERA PARA A REGIÃO DE ÉVORA NO MÊS DE JUNHO DE 2016, FIGURA SEMELHANTE À FIGURA 5.2 MAS RESPEITANTE AO MÊS DE JUNHO.

A Figura 5.9 mostra o *scatter plot* para o mês de junho. Neste mês os dados estão muito relacionados, tendo muitos valores próximos da reta linear. De um modo geral, os dados são sobrestimados pelo modelo de radiação do ECMWF.

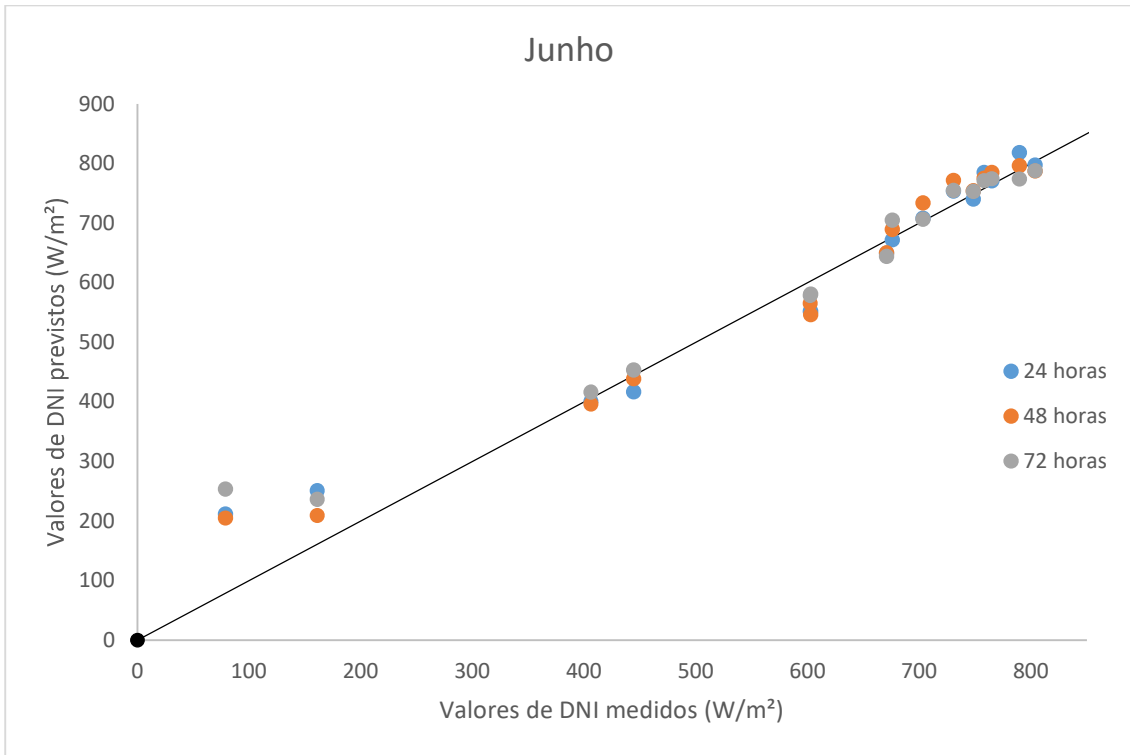


FIGURA 5.9 - SCATTER PLOT DO DNI MEDIDO VS PREVISTO PARA O MÊS DE JUNHO

5.2.4 Julho

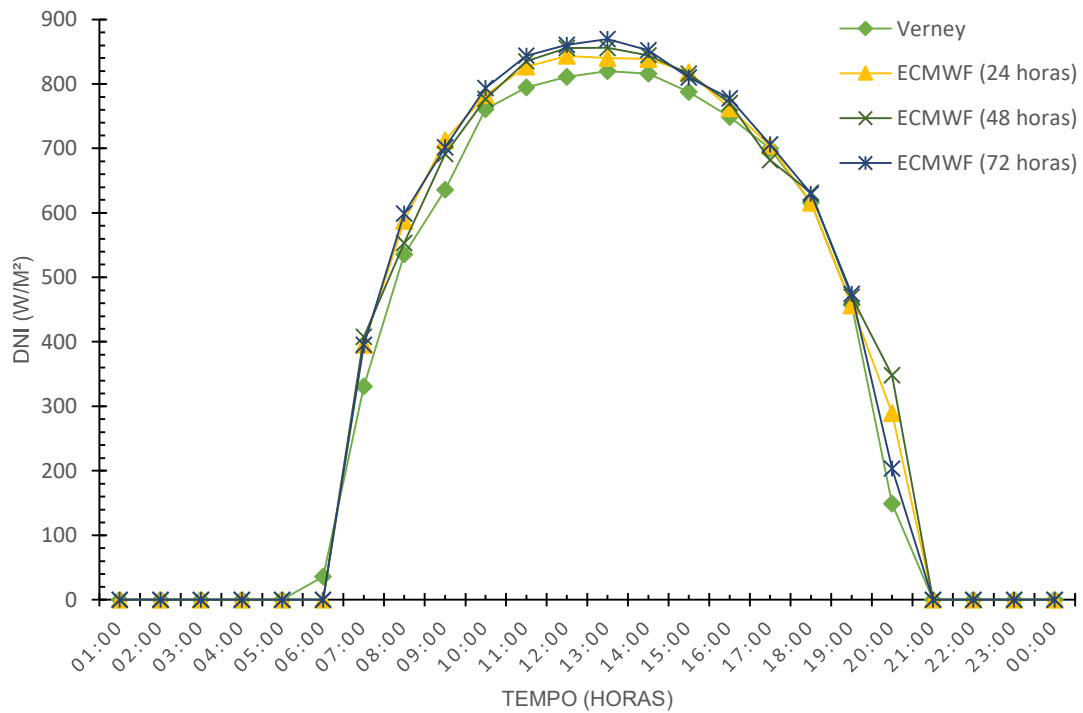


FIGURA 5.10 - CICLO DIÁRIO MÉDIO DO DNI PARA O MÊS DE JULHO

No mês de julho a previsão de DNI não apresenta uma previsão tão boa como a do mês de junho (ver Figura 5.10). Há uma ligeira sobrestimação do modelo do ECMWF, que não devia ser tão alto devido ao mês de julho apresentar um grande número de dias de céu limpo, mas pode ser explicado através da presença em grande número de aerossóis em vinte dias e de vapor de água em igualmente vinte dias (ver Figura 5.11). Com estas condições presentes na atmosfera sobre Évora é possível explicar porque num mês de muitas poucas nuvens presentes no céu, com apenas três dias de céu nublado, haja uma sobrestimação do modelo. As três previsões de DNI apresentam resultados muito satisfatórios, destacando-se a previsão a 24 horas como a mais aproximada em relação aos resultados medidos.

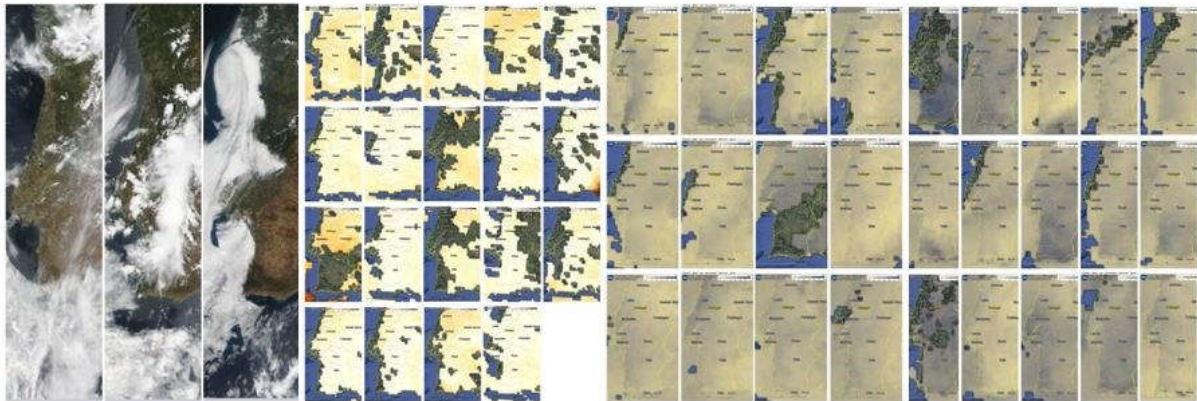


FIGURA 5.11 - NEBULOSIDADE, AEROSSÓIS E VAPOR DE ÁGUA PRESENTES NA ATMOSFERA PARA A REGIÃO DE ÉVORA NO MÊS DE JULHO DE 2016, FIGURA SEMELHANTE À FIGURA 5.2 MAS RESPEITANTE AO MÊS DE JULHO.

O mês de julho apresenta um *scatter plot* com bons resultados, ocorrendo na maioria dos valores uma sobrestimação em relação aos valores medidos (ver Figura 5.12).

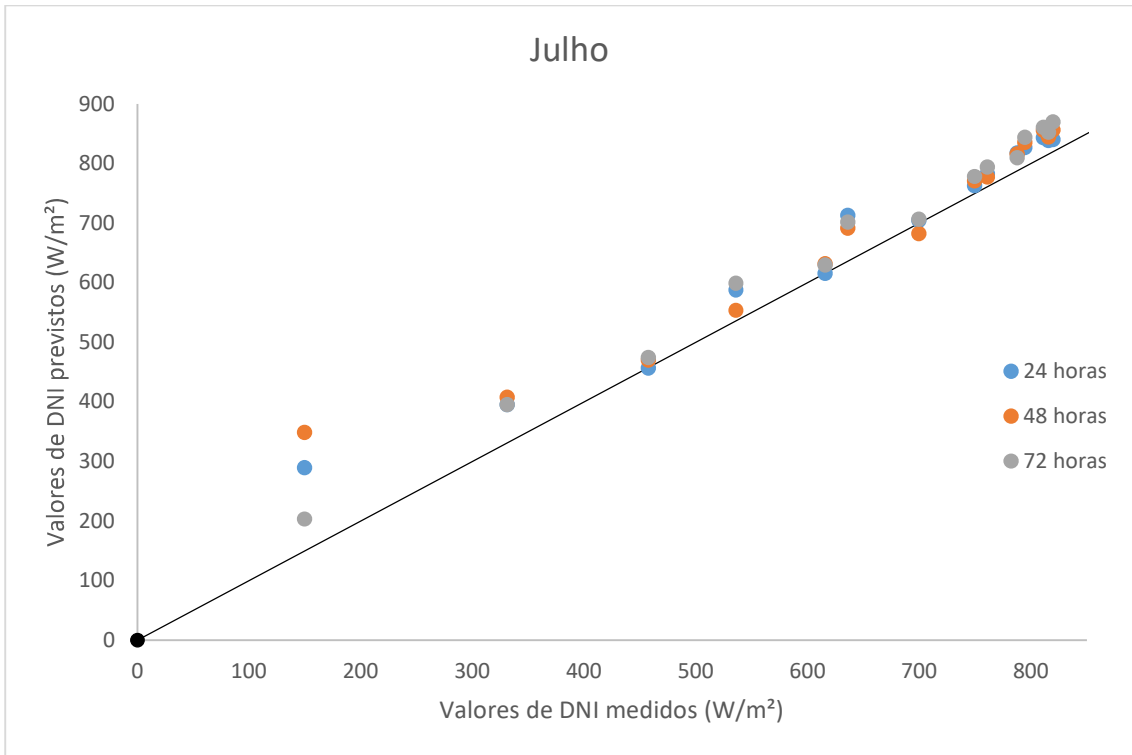


FIGURA 5.12 - SCATTER PLOT DO DNI MEDIDO VS PREVISTO PARA O MÊS DE JULHO

5.2.5 Agosto

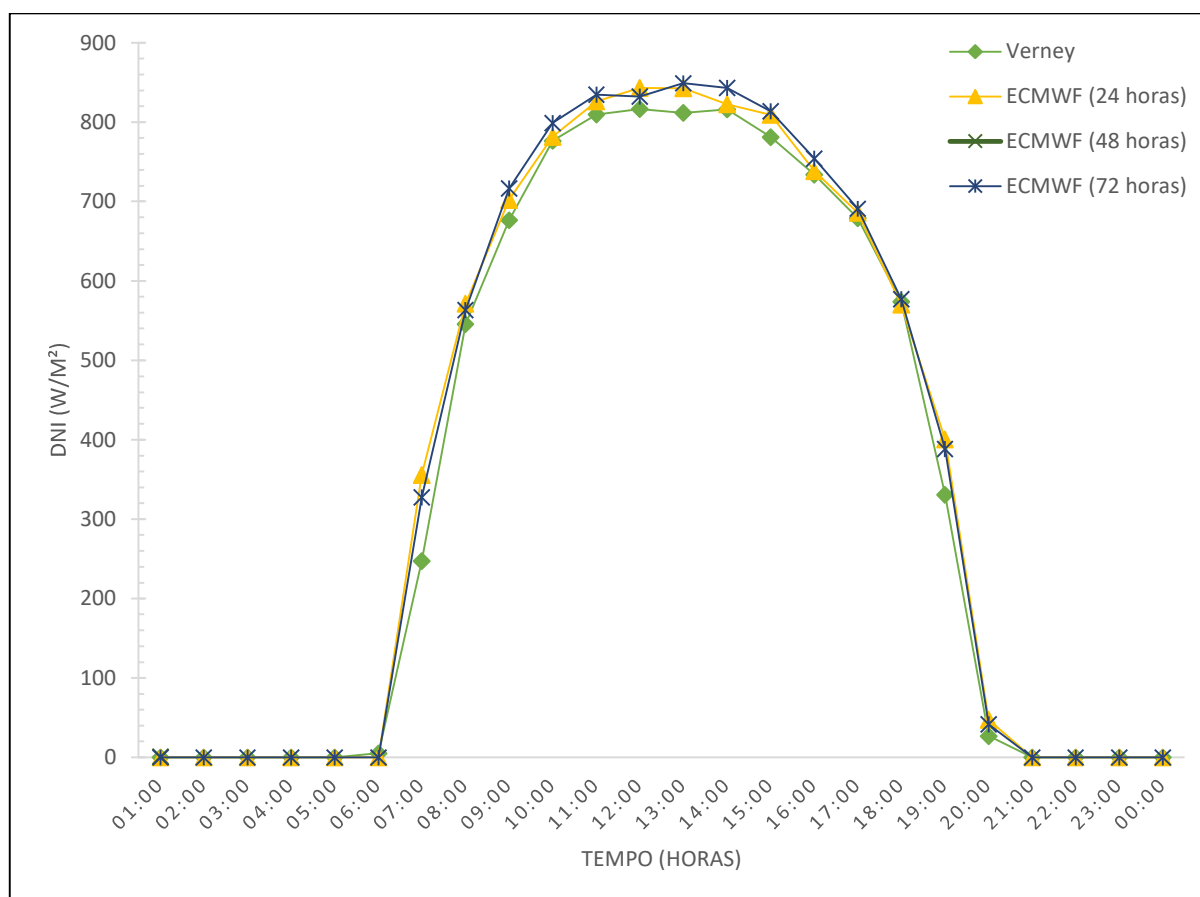


FIGURA 5.13 - CICLO DIÁRIO MÉDIO DO DNI PARA O MÊS DE AGOSTO

Para o mês de agosto a qualidade da previsão de DNI apresenta resultados muito satisfatórios (ver Figura 5.13). Ocorre uma ligeira sobrestimação de DNI que chega à superfície terrestre, que pode ser explicado pela presença na atmosfera de um elevado número de aerossóis na atmosfera em vinte sete dias do mês e pela presença de vapor de água em vinte um dia e apenas ocorreram dois dias de céu nublado (ver Figura 5.14). Verifica-se que para as diferentes previsões horárias ambas apresentam resultados muito bons, destacando-se das outras previsões a previsão a 24 horas.

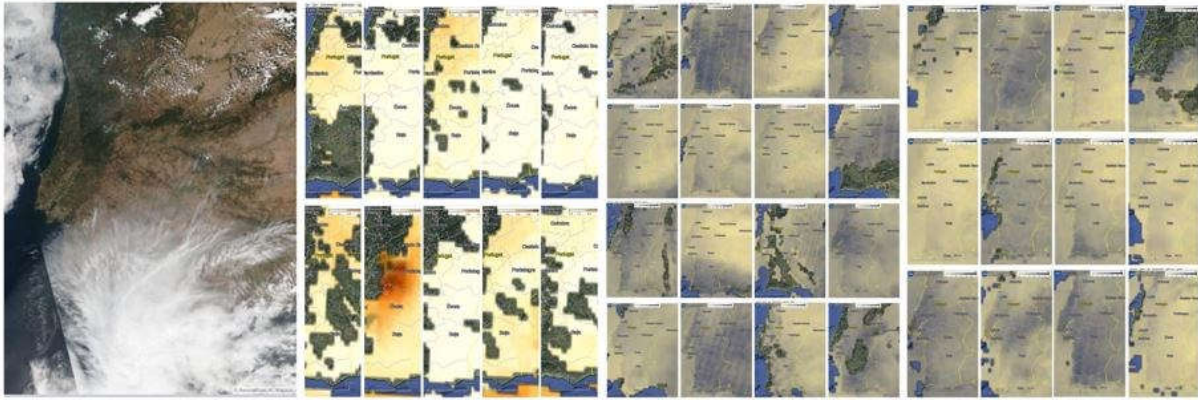


FIGURA 5.14 - NEBULOSIDADE, AEROSSÓIS E VAPOR DE ÁGUA PRESENTES NA ATMOSFERA PARA A REGIÃO DE ÉVORA NO MÊS DE AGOSTO DE 2016, FIGURA SEMELHANTE À FIGURA 5.2 MAS RESPEITANTE AO MÊS DE AGOSTO.

Como nos meses anteriores de junho e julho, agosto também apresenta valores muito relacionados entre os dados medidos e previstos através do *scatter plot* (ver Figura 5.15). Ao longo do mês verifica-se que ocorreu uma sobrestimação dos dados previstos.

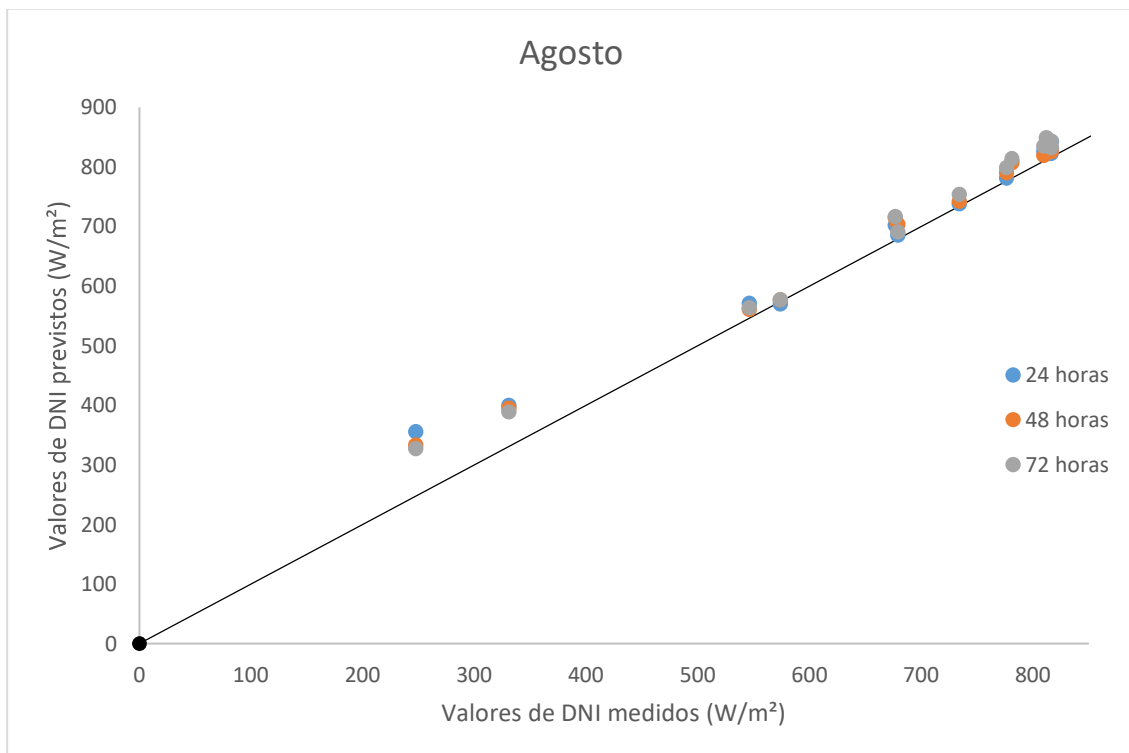


FIGURA 5.15 - SCATTER PLOT DO DNI MEDIDO VS PREVISTO PARA O MÊS DE AGOSTO

5.2.6 Setembro

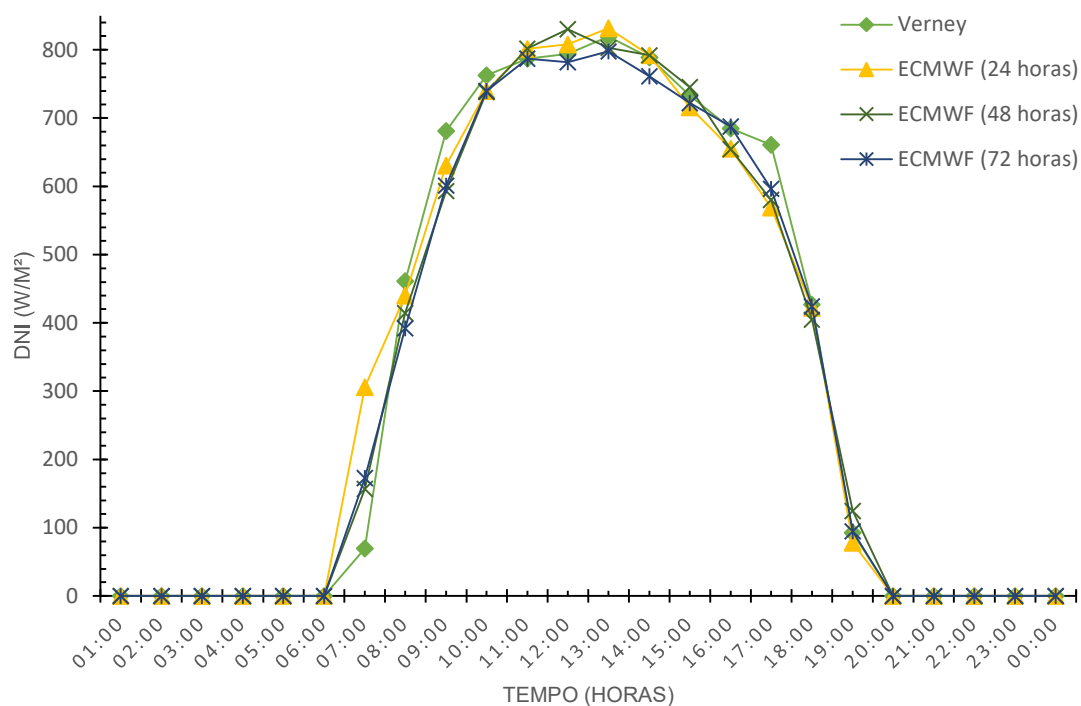


FIGURA 5.16 - CICLO DIÁRIO MÉDIO DO DNI PARA O MÊS DE SETEMBRO

Para o mês de setembro a qualidade da previsão apresenta pouco erro comparada com a medição real (ver Figura 5.16). O erro associado à previsão do DNI é explicado por uma grande presença de um grande número de vapor de água, presente em vinte sete dias, e o aparecimento de aerossóis em dez dias. Ao nível da nebulosidade, esta teve pouca influência na qualidade da previsão de DNI havendo apenas seis dias com presença de céu nublado (ver Figura 5.17). De um modo geral, há uma sobrestimação da previsão a 24 horas e a 48 horas, ao contrário do que ocorre para a previsão a 72 horas em que há uma subestimação do DNI a chegar à superfície terrestre, principalmente ao meio dia solar. Neste mês verifica-se que a previsão de DNI a 72 horas apresenta melhores resultados em comparação com as restantes previsões horárias.

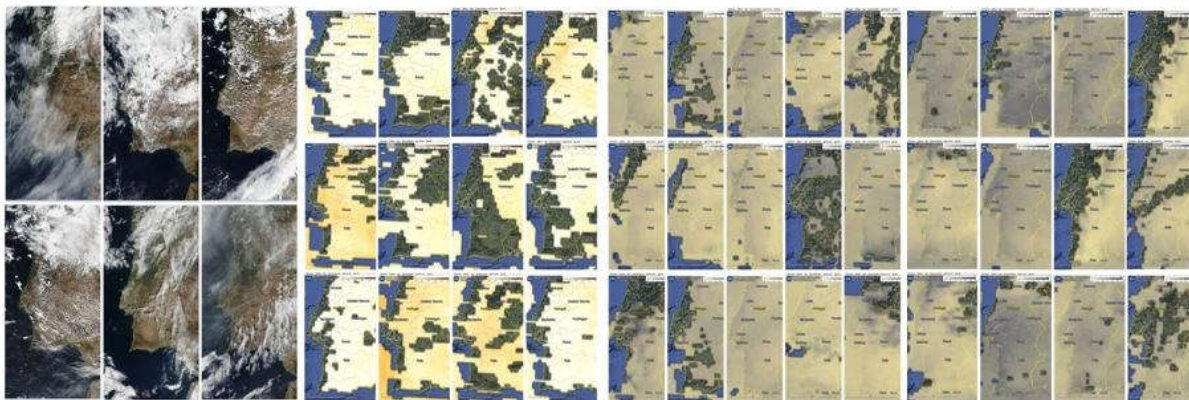


FIGURA 5.17 - NEBULOSIDADE, AEROSSÓIS E VAPOR DE ÁGUA PRESENTES NA ATMOSFERA PARA A REGIÃO DE ÉVORA NO MÊS DE SETEMBRO DE 2016, FIGURA SEMELHANTE À FIGURA 5.2 MAS RESPEITANTE AO MÊS DE SETEMBRO.

Sendo setembro um mês que pertence ao verão, este não apresenta resultados tão relacionados com nos meses de junho, julho e agosto (ver Figura 5.18). Neste mês verifica-se que tanto os resultados são sobrevalorizados como também acabam por ser subestimados.

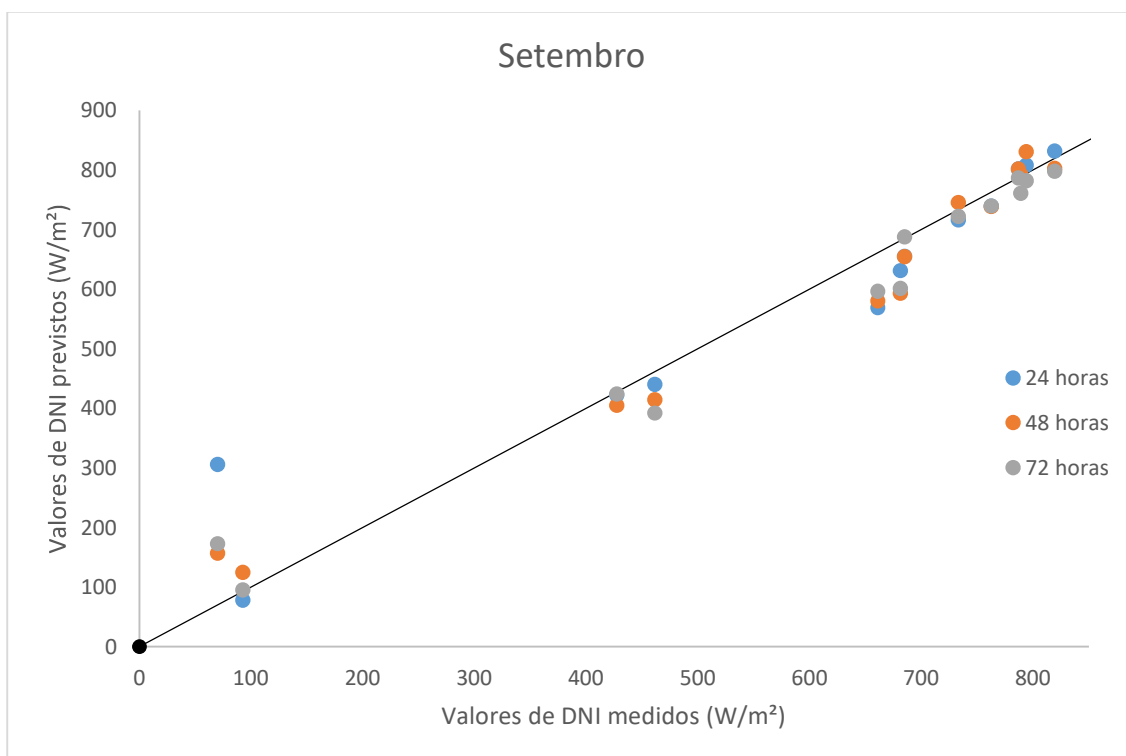


FIGURA 5.18 - SCATTER PLOT DO DNI MEDIDO VS PREVISTO PARA O MÊS DE SETEMBRO

5.2.7 Outubro

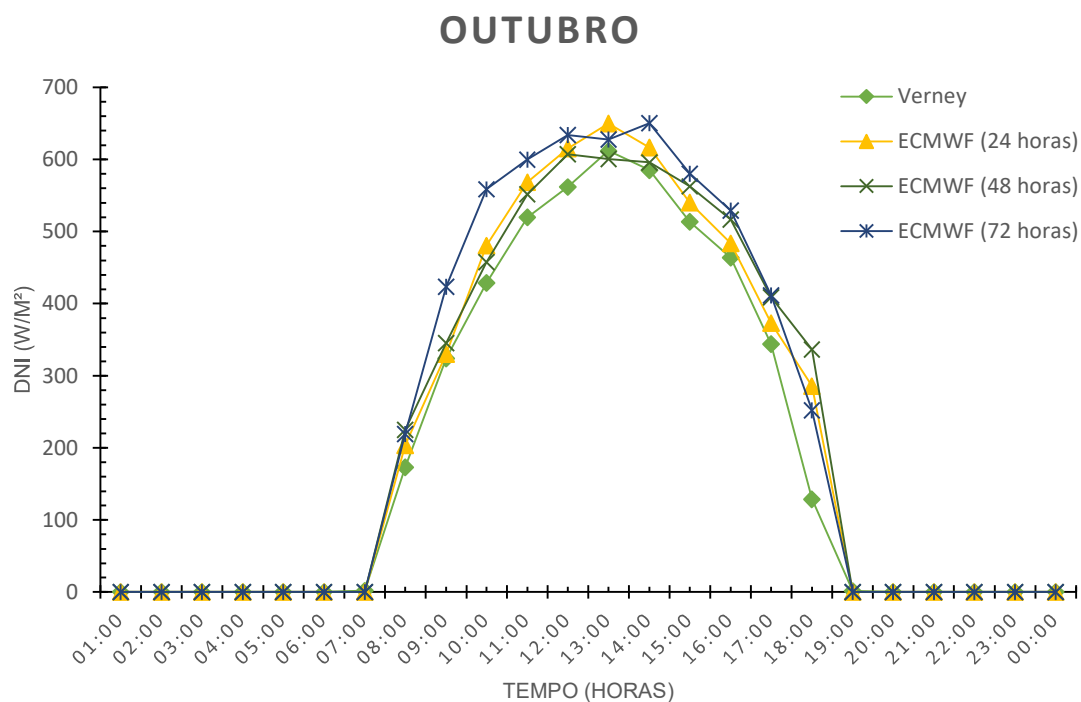


FIGURA 5.19 - CICLO DIÁRIO MÉDIO DO DNI PARA O MÊS DE OUTUBRO

Em outubro de um modo geral há sobrestimação do modelo em relação aos dados medidos, para as diferentes previsões horárias (ver Figura 5.19). A presença de vapor de água foi elevada, ocorrendo altos valores em dezassete dias, e a alta presença de aerossóis ocorreu com menor frequência, em onze dias (ver Figura 5.20). Ao nível de nebulosidade houve treze dias com céu nublado. Com estas condições enumeradas é explicável que a qualidade da previsão de DNI não apresente resultados muito satisfatórios em comparação com os resultados de DNI medidos. Das três previsões de DNI realizadas pelo ECMWF a previsão a 48 horas apresenta melhores resultados até ao meio dia e a partir desse período a previsão a 24 horas apresenta resultados mais aproximados dos medidos.

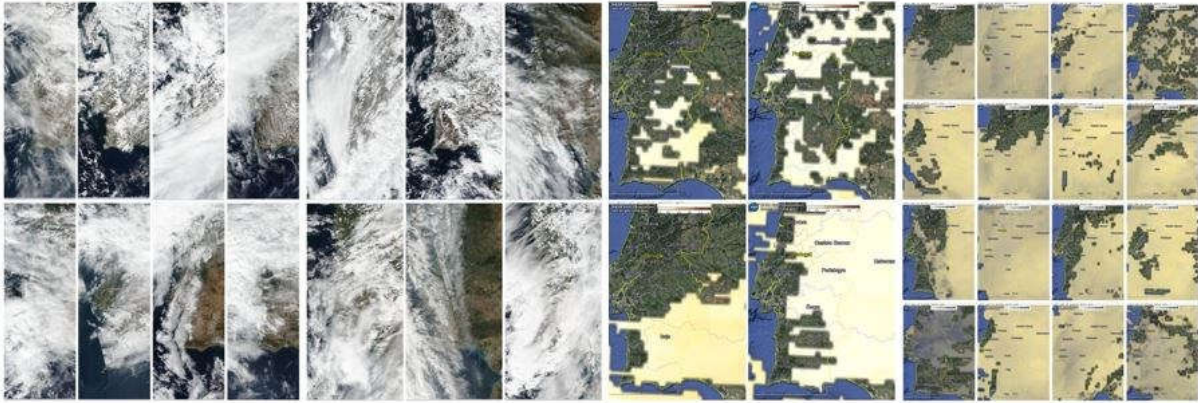


FIGURA 5.20 - NEBULOSIDADE, AEROSSÓIS E VAPOR DE ÁGUA PRESENTES NA ATMOSFERA PARA A REGIÃO DE ÉVORA NO MÊS DE OUTUBRO DE 2016, FIGURA SEMELHANTE À FIGURA 5.2 MAS RESPEITANTE AO MÊS DE OUTUBRO.

Como mostra a Figura 5.21 verifica-se que os dados previstos pelo modelo de radiação do ECMWF não são muito relacionados com os dados medidos. Na maioria das previsões ocorre sobrestimação dos dados de DNI.

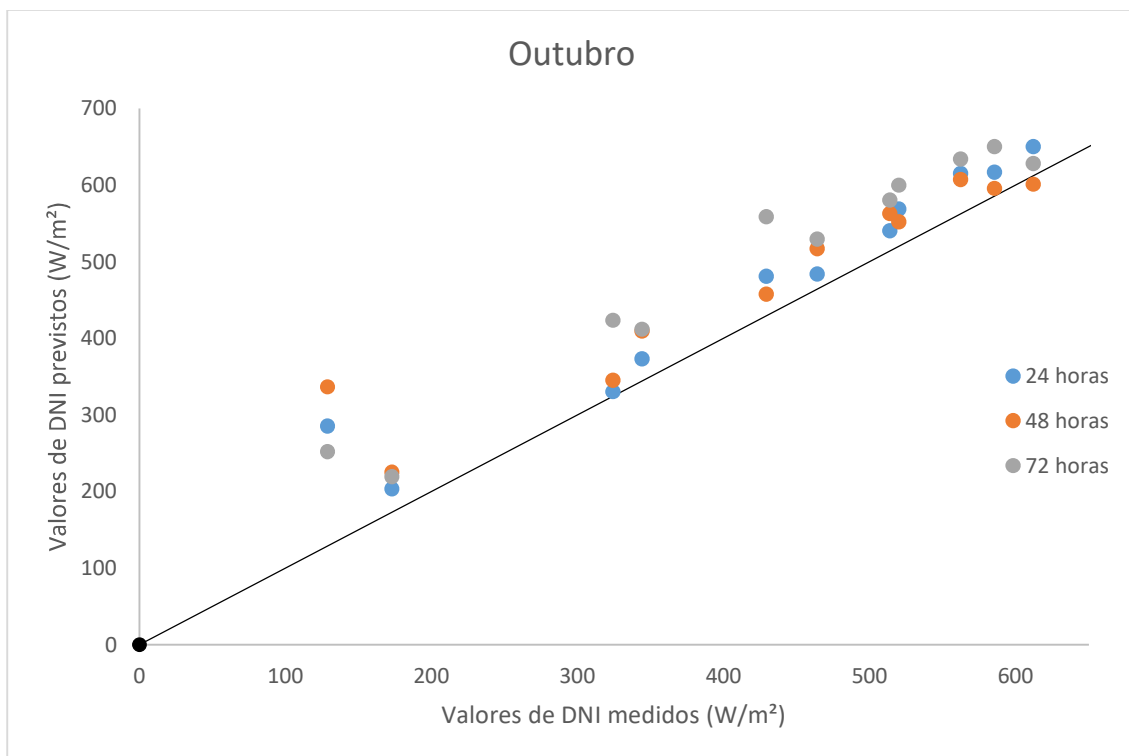


FIGURA 5.21 - SCATTER PLOT DO DNI MEDIDO VS PREVISTO PARA O MÊS DE OUTUBRO

5.2.8 Novembro

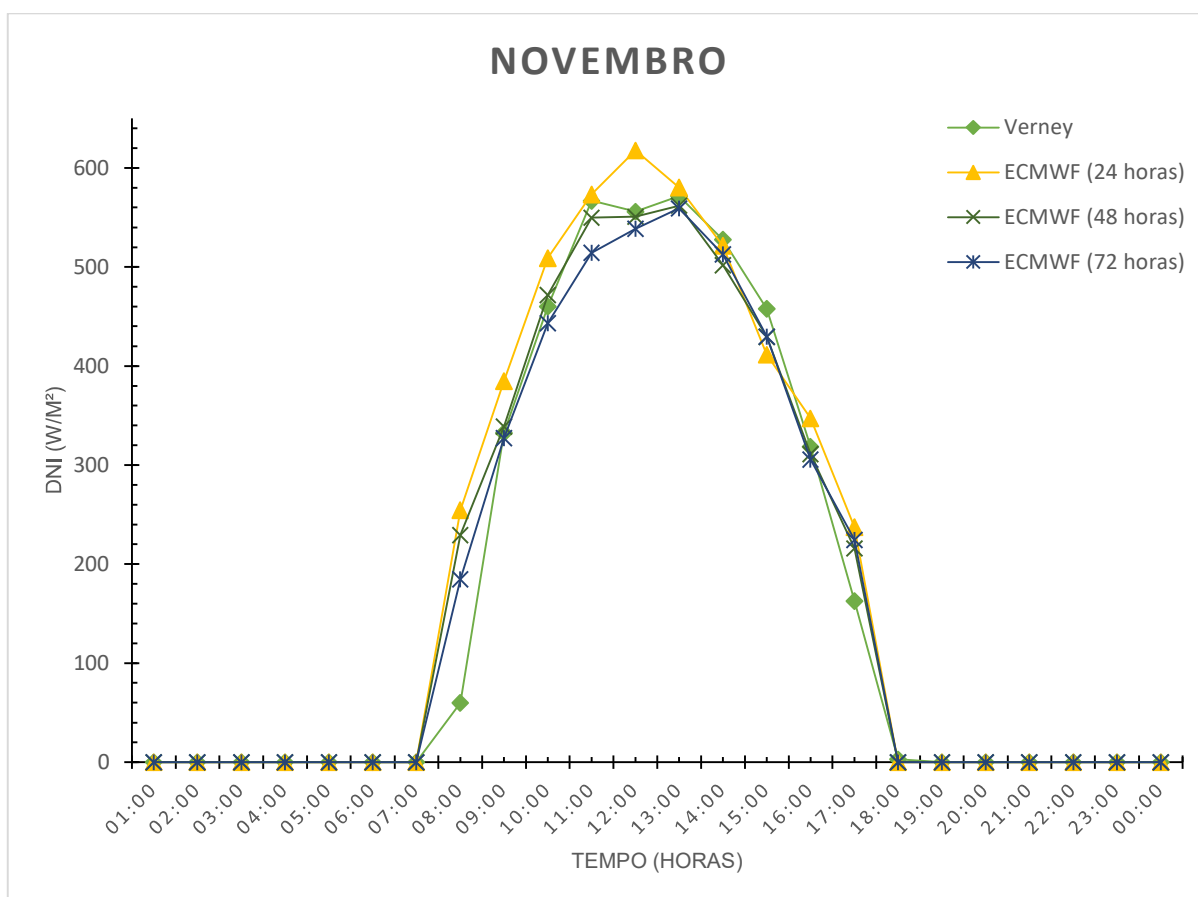


FIGURA 5.22 - CICLO DIÁRIO MÉDIO DO DNI PARA O MÊS DE NOVEMBRO

Para o mês de novembro a previsão de DNI foi sobrestimada para a previsão a 24 horas e a 48 horas, enquanto que para a previsão a 72 horas, de um modo geral, ocorre uma sobrestimação em relação aos dados medidos (ver Figura 5.22). Neste mês o erro principal ocorre ao meio dia, ocorrendo uma queda nos valores nesse período. A qualidade das previsões pode ser explicada pelas condições atmosféricas presentes nesse mês, em que ocorreram treze dias com céu nublado, treze com presença de altos valores de vapor de água e nove dias com presença em grande número de aerossóis (ver Figura 5.23). Com todas estas condições presentes na atmosfera, os resultados das previsões do ECMWF acabam por ser um pouco afetados, principalmente no período até ao meio dia. De realçar que as previsões de DNI de 24 horas e 48 horas apresentam resultados muito semelhantes, principalmente a partir do meio dia.

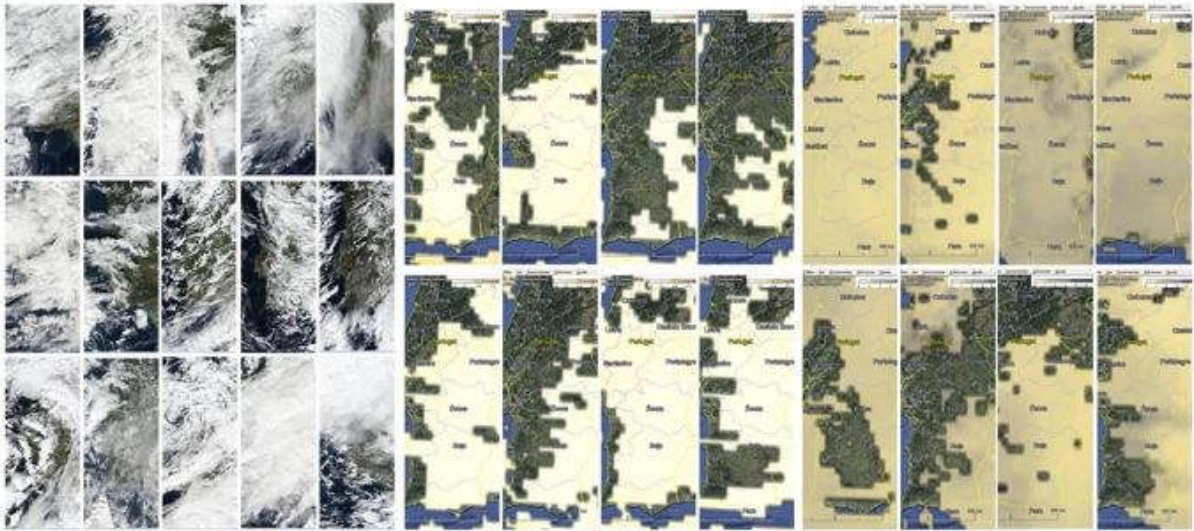


FIGURA 5.23 - NEBULOSIDADE, AEROSSÓIS E VAPOR DE ÁGUA PRESENTES NA ATMOSFERA PARA A REGIÃO DE ÉVORA NO MÊS DE NOVEMBRO DE 2016, FIGURA SEMELHANTE À FIGURA 5.2 MAS RESPEITANTE AO MÊS DE NOVEMBRO.

O *scatter plot* para o mês de novembro apresenta resultados um pouco dispersos para valores inferiores e mais relacionados para valores superiores (ver Figura 5.24). No geral, os dados previstos de DNI são sobrevalorizados e subestimados.

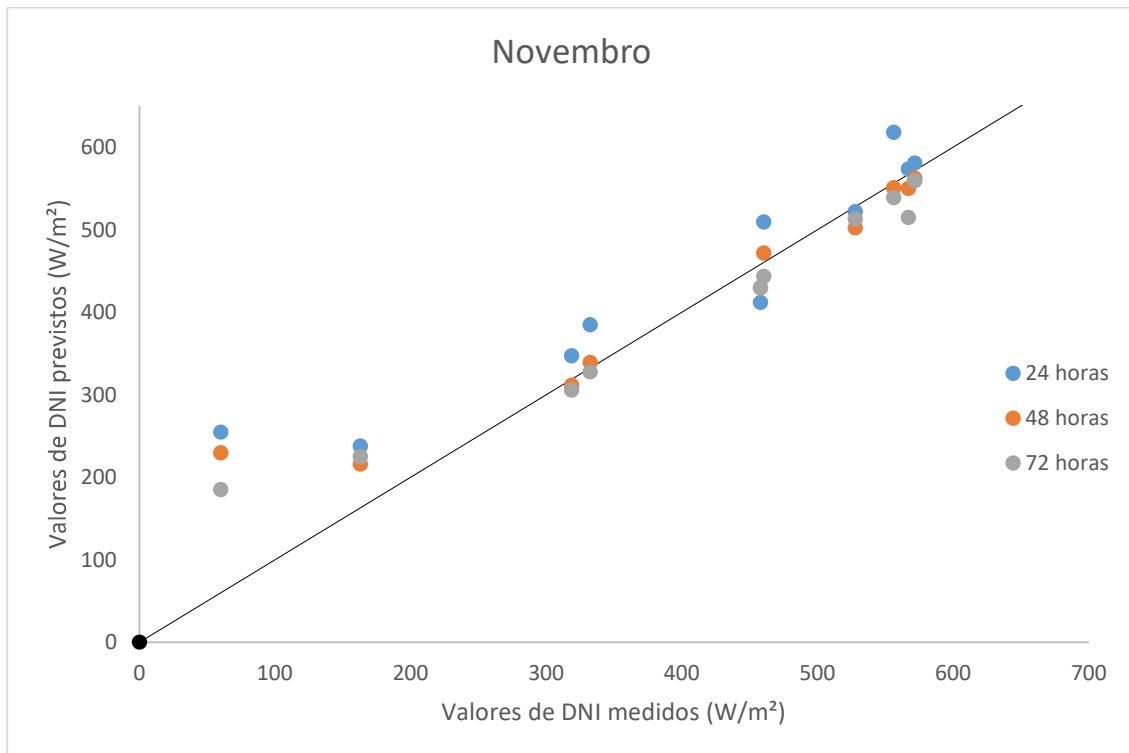


FIGURA 5.24 - SCATTER PLOT DO DNI MEDIDO VS PREVISTO PARA O MÊS DE NOVEMBRO

5.2.9 Dezembro

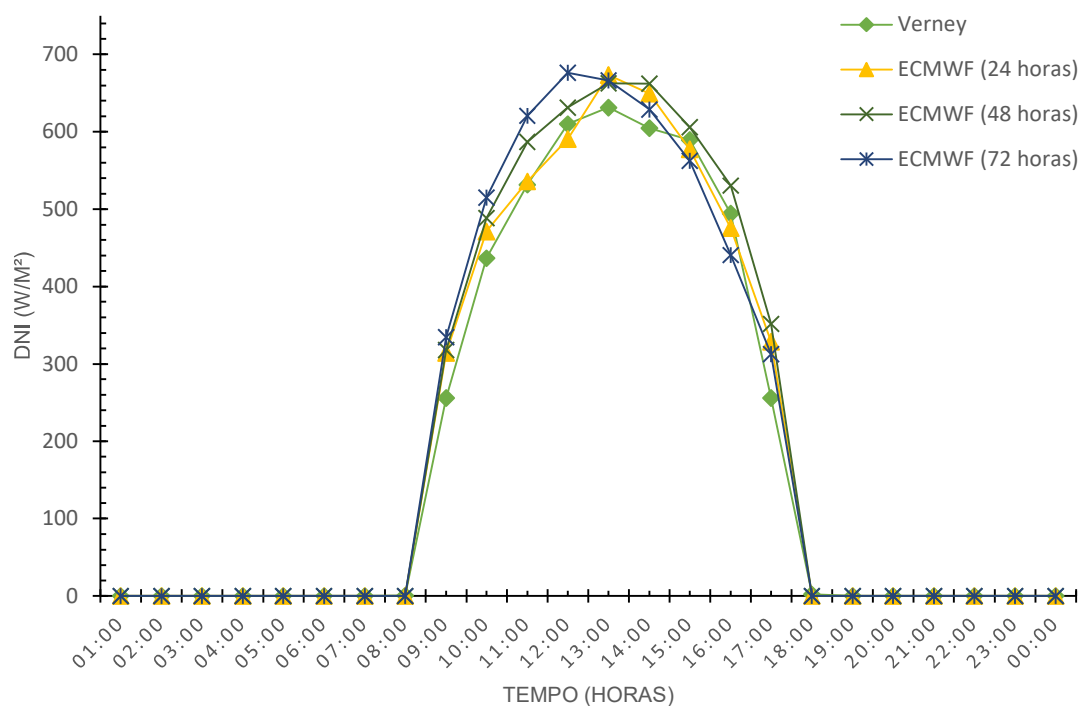


FIGURA 5.25 - CICLO DIÁRIO MÉDIO DO DNI PARA O MÊS DE DEZEMBRO

No mês de dezembro ocorre uma sobrestimação do DNI presente em todas as previsões horárias provenientes do modelo do ECMWF até meio do dia, a partir desse momento ocorre uma ligeira subestimação das previsões de 24 e 72 horas (ver Figura 5.25). A previsão do DNI a 24 horas é a que apresenta melhores resultados das três previsões. A qualidade da previsão não foi a desejada, mas o mês de dezembro tem preponderância a ter instabilidade atmosférica e a presença de nove dias de nebulosidade, dezassete dias com alta presença de vapor de água e doze dias com a presença de grande número de aerossóis afetaram a qualidade da previsão (ver Figura 5.26)

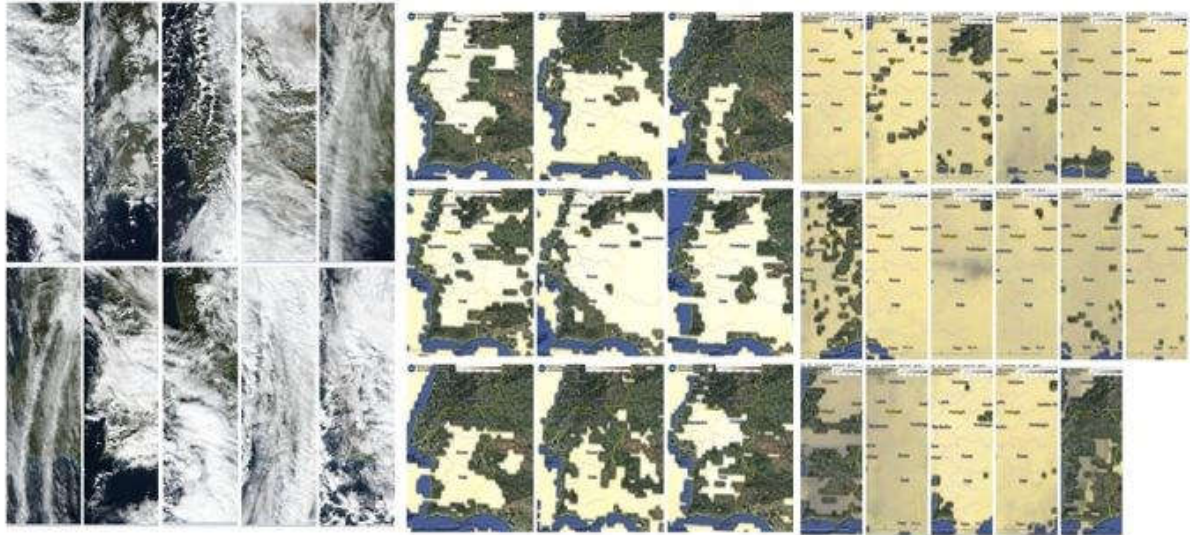


FIGURA 5.26 - NEBULOSIDADE, AEROSSÓIS E VAPOR DE ÁGUA PRESENTES NA ATMOSFERA PARA A REGIÃO DE ÉVORA NO MÊS DE DEZEMBRO DE 2016, FIGURA SEMELHANTE À FIGURA 5.2 MAS RESPEITANTE AO MÊS DE DEZEMBRO.

Para dezembro o *scatter plot* apresenta valores um pouco relacionados para valores superiores (ver Figura 5.27). Os valores previstos pelo modelo de radiação do ECMWF apresentam, no geral, uma sobrestimação dos dados medidos.

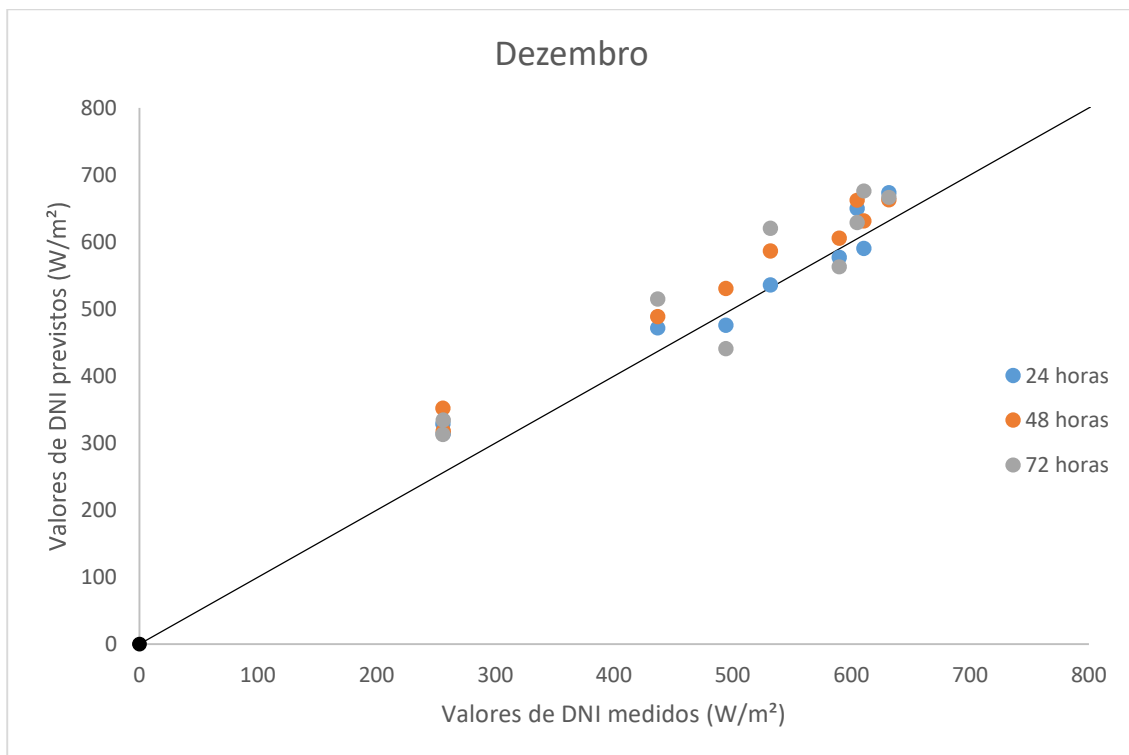


FIGURA 5.27 - SCATTER PLOT DO DNI MEDIDO VS PREVISTO PARA O MÊS DE DEZEMBRO

5.2.10 Janeiro

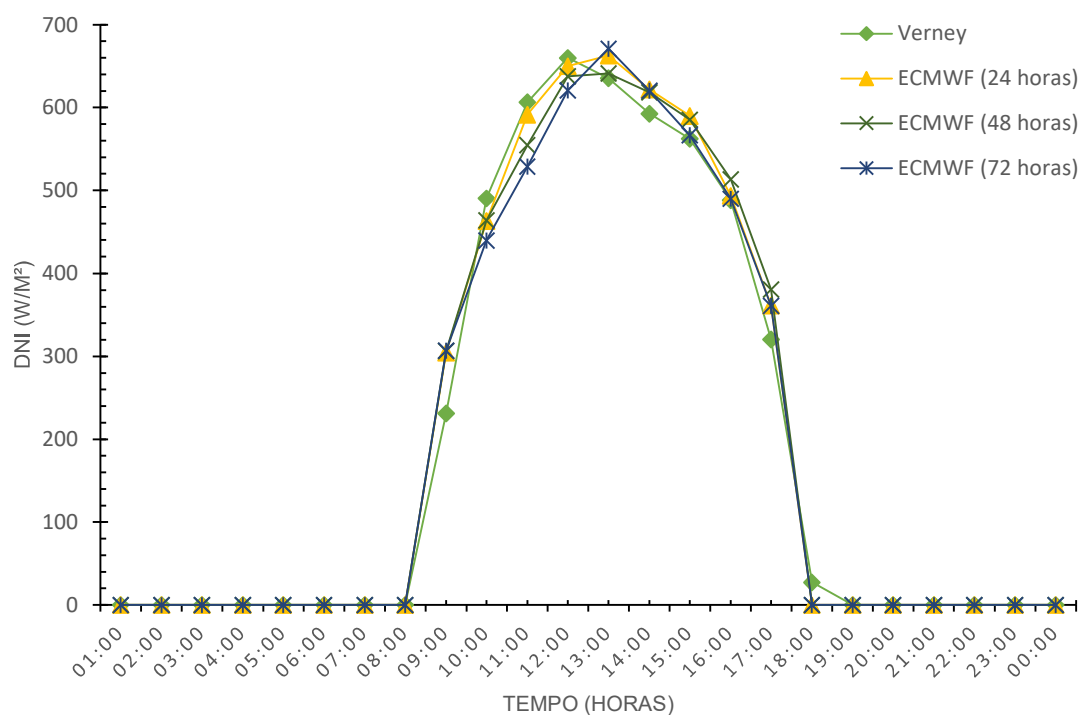


FIGURA 5.28 - CICLO DIÁRIO MÉDIO DO DNI PARA O MÊS DE JANEIRO

No mês de janeiro verifica-se que a previsão de DNI é subestimada até ao período do meio dia e a partir desse período a previsão de DNI é sobrestimada, apesar de não ser significativa (ver Figura 5.28). Este mês ficou caracterizado a nível atmosférico pela presença de doze dias de céu nublado, pela presença de dezoito dias com alto teor vapor de água e seis dias com alta presença de aerossóis que afetaram a qualidade da previsão (ver Figura 5.29). De um modo geral a previsão para este mês foi boa, apresentando resultados muito próximos dos medidos, apenas com algumas diferenças a meio do dia.

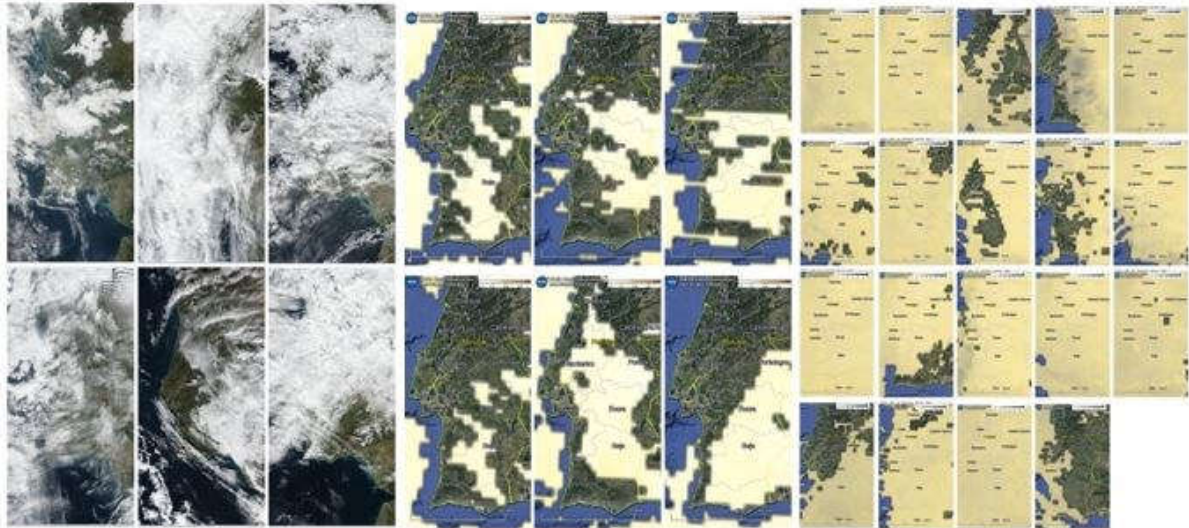


FIGURA 5.29 - NEBULOSIDADE, AEROSSÓIS E VAPOR DE ÁGUA PRESENTES NA ATMOSFERA PARA A REGIÃO DE ÉVORA NO MÊS DE JANEIRO DE 2017, FIGURA SEMELHANTE À FIGURA 5.2 MAS RESPEITANTE AO MÊS DE JANEIRO.

O mês de janeiro apresenta um *scatter plot* com os dados previstos e medidos relacionados no geral (ver Figura 5.30). Ao longo do referido mês tanto ocorreu sobrestimação como subestimação.

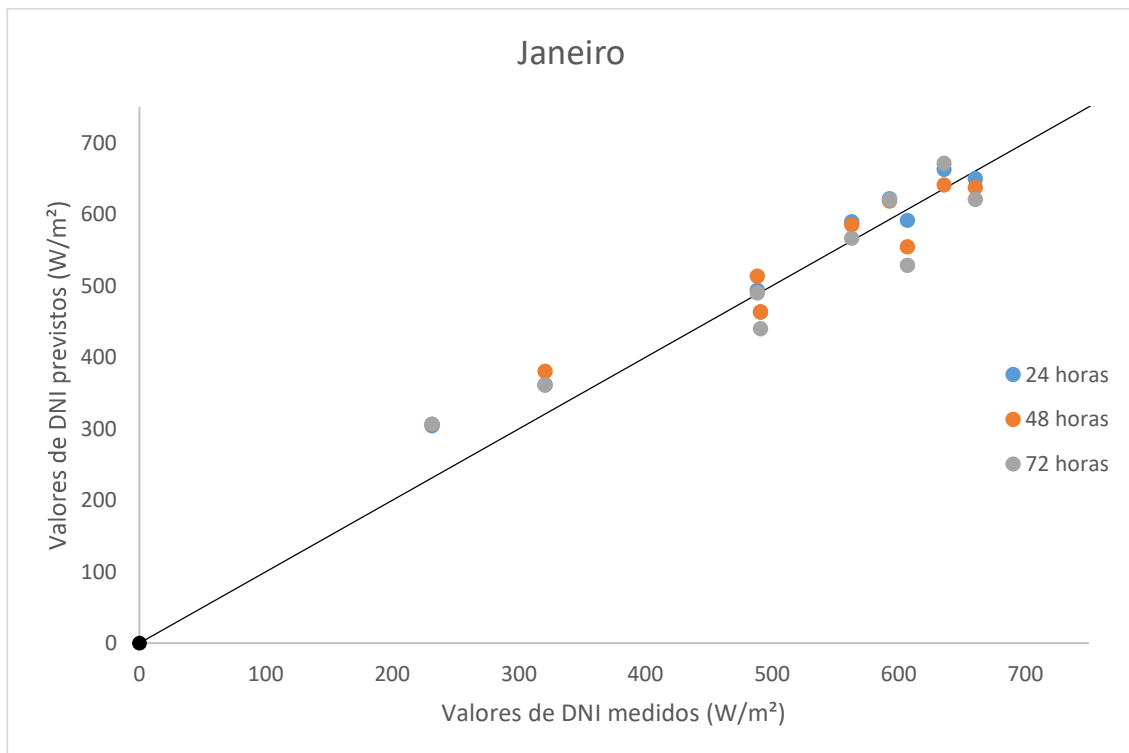


FIGURA 5.30 - SCATTER PLOT DO DNI MEDIDO VS PREVISTO PARA O MÊS DE JANEIRO

5.2.11 Fevereiro

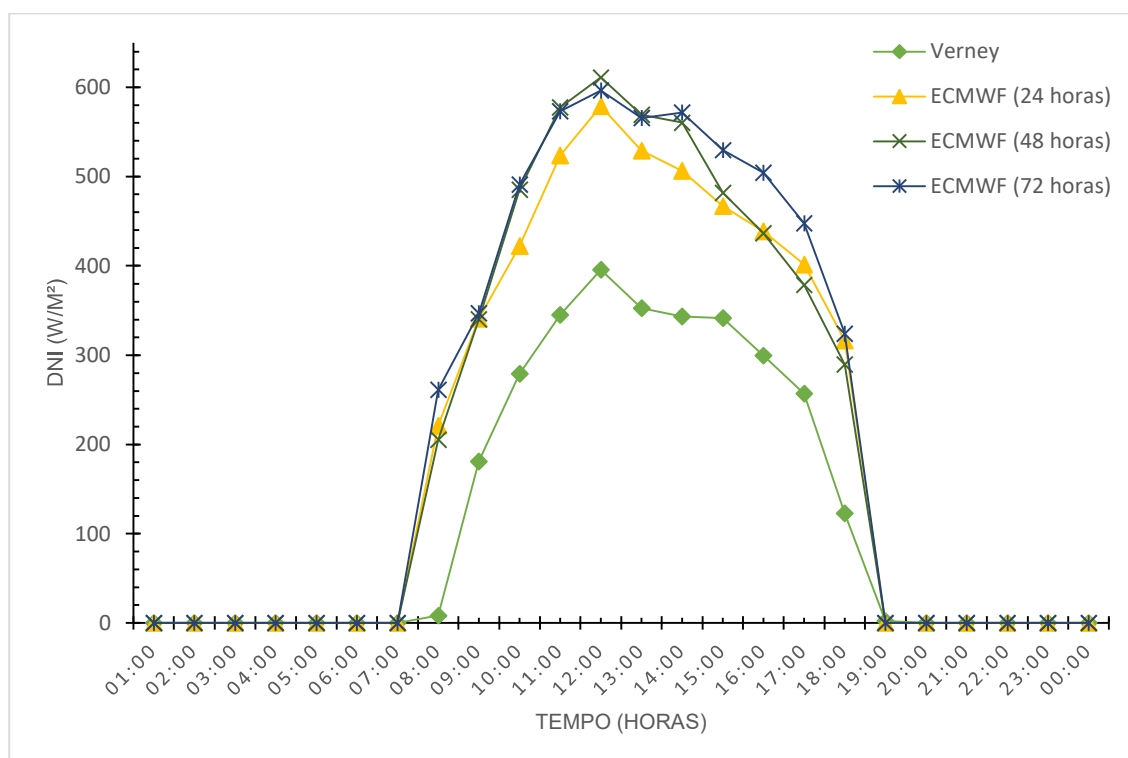


FIGURA 5.31 - CICLO DIÁRIO MÉDIO DO DNI PARA O MÊS DE FEVEREIRO

De todos os meses analisados, o mês de fevereiro é o que apresenta uma sobrestimação mais elevada, comparada com os valores medidos (ver Figura 5.31). De todas as previsões médias horárias a previsão a 24 horas é a que apresenta melhores resultados. Neste mês as condições atmosféricas foram afetadas em maior parte pela nebulosidade presente em vinte dias que acabou por se traduzir em valores baixos de DNI medido. A quantidade de dias com presença em grande quantidade de vapor de água foram apenas seis e com a presença de alto teor de aerossóis foram registados cinco dias (ver Figura 5.32). A qualidade da previsão de DNI acaba por ficar seriamente afetada pelo maior número de dias de céu nublado e pela presença de aerossóis e de vapor de água.

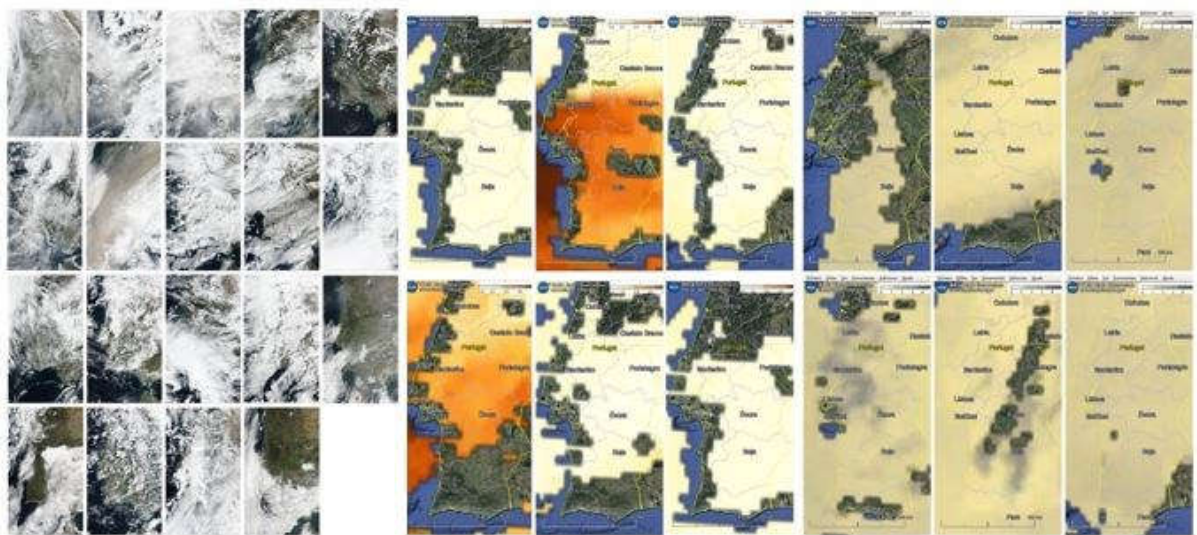


FIGURA 5.32 - NEBULOSIDADE, AEROSSÓIS E VAPOR DE ÁGUA PRESENTES NA ATMOSFERA PARA A REGIÃO DE ÉVORA NO MÊS DE FEVEREIRO DE 2017, FIGURA SEMELHANTE À FIGURA 5.2 MAS RESPEITANTE AO MÊS DE FEVEREIRO.

No mês de fevereiro, este apresenta um *scatter plot* com os dados muito afastados do resultado ideal (ver Figura 5.33). Em todos os dados previstos ocorreu sobrestimação do resultado medido de DNI.

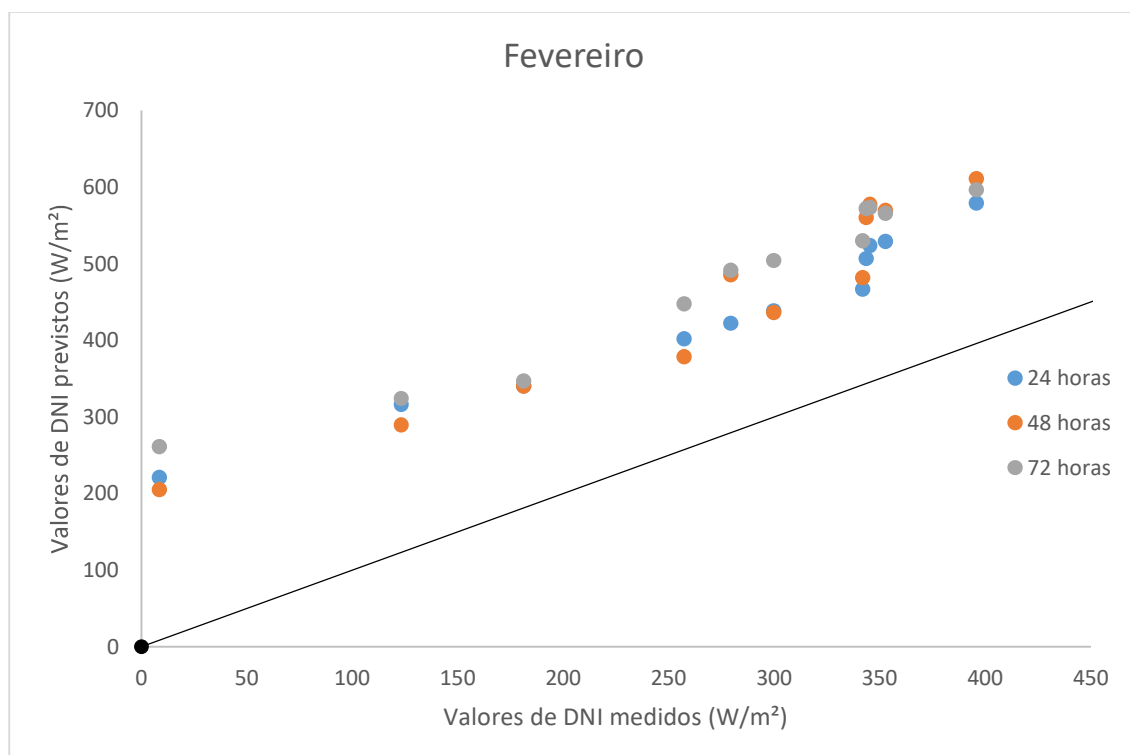


FIGURA 5.33 - SCATTER PLOT DO DNI MEDIDO VS PREVISTO PARA O MÊS DE FEVEREIRO

5.2.12 Março

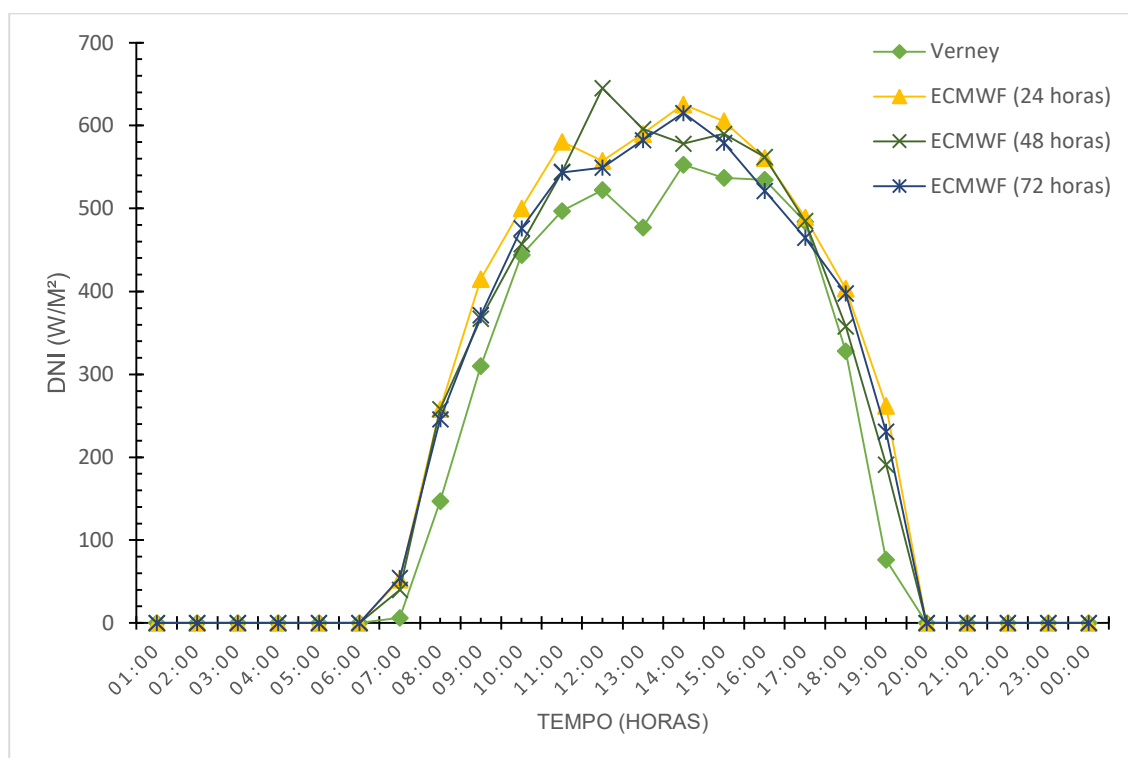


FIGURA 5.34 - CICLO DIÁRIO MÉDIO DO DNI PARA O MÊS DE MARÇO

No mês de março ocorre uma sobrestimação, de um modo geral, do modelo previsão de DNI do ECMWF (ver Figura 5.34). A previsão de DNI que apresenta melhores resultados é a previsão a 72 horas. Este mês é assinalado por ocorrência de erro em maior número ao meio dia, onde todas as previsões de DNI são sobrestimadas. Este mês fica assinalado pela presença de dezoito dias de céu nublado, bem como de vinte dias com presença de vapor de água e dezoito com aparecimento de aerossóis (ver Figura 5.35). Estes fatores terão tido influência na qualidade da previsão de DNI do ECMWF, principalmente o número de dias com céu nublado que prejudicaram em grande parte o resultado das previsões. No geral, ambas a três previsões apresentam resultados semelhantes.

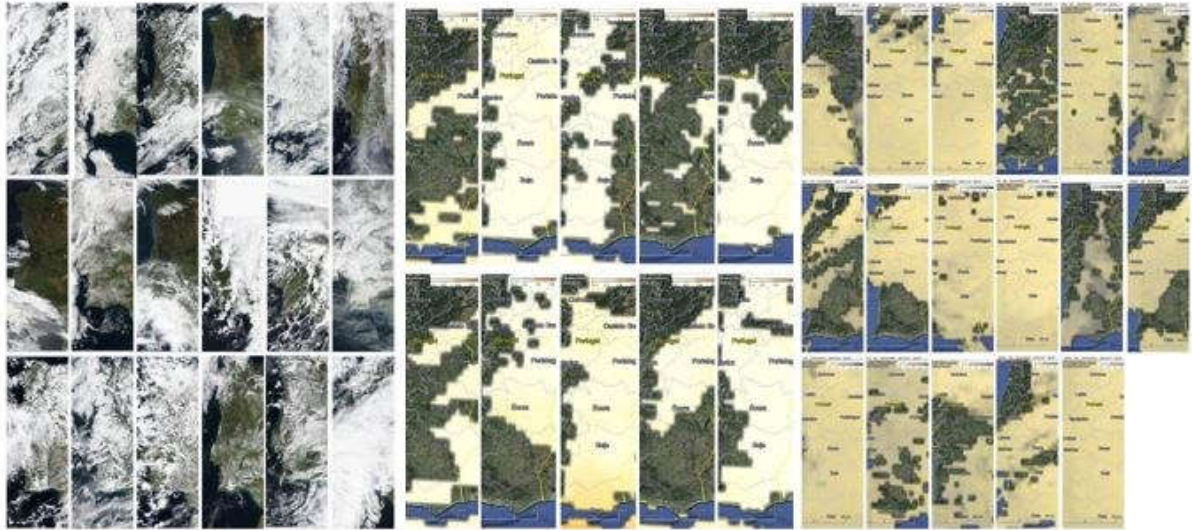


FIGURA 5.35 - NEBULOSIDADE, AEROSÓIS E VAPOR DE ÁGUA PRESENTES NA ATMOSFERA PARA A REGIÃO DE ÉVORA NO MÊS DE MARÇO DE 2017, FIGURA SEMELHANTE À FIGURA 5.2 MAS RESPEITANTE AO MÊS DE MARÇO.

Na Figura 5.36 observa-se que os valores de DNI mais baixos apresentam menos relacionamento do que os valores mais elevados. De um modo geral, há uma sobrestimação dos dados.

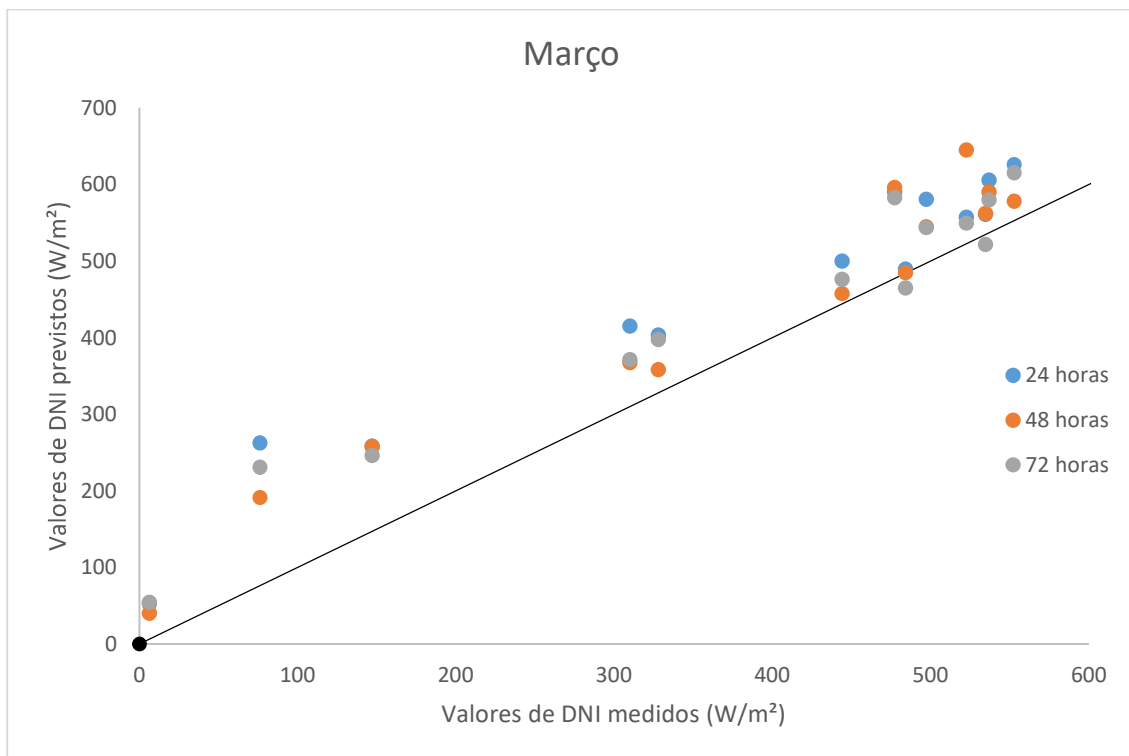


FIGURA 5.36 - SCATTER PLOT DO DNI MEDIDO VS PREVISTO PARA O MÊS DE MARÇO

5.3. Métricas estatísticas para os três dias de previsão

Com a finalidade de avaliar a qualidade da previsão do DNI para a região de Évora foram aplicadas várias métricas estatísticas de modo a avaliar os resultados obtidos através dos dados medidos de DNI no Verney e da previsão de DNI efetuada pelo ECMWF.

Os dados para esta análise perfazem um total de 365 dias e as variáveis utilizadas foram descritas anteriormente. A análise estatística vai ser analisada e discutida para cada período de previsão.

Os resultados obtidos para cada previsão são apresentados nas Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7, onde contempla o erro percentual absoluto médio (MAPE), a tendência do erro médio (MBE), o erro quadrático médio (RMSE) e o coeficiente de correlação (r).

5.3.1 Previsão de DNI a 24 horas

TABELA 5 - TESTES ESTATÍSTICOS PARA CADA MÊS PARA A PREVISÃO A 24 HORAS DE DNI

Mês	MAPE (%)	MBE (W/m ²)	RMSE (W/m ²)	Correlação
Abril	6,26	30,59	230,90	0,76
Maio	6,89	49,33	210,89	0,81
Junho	0,30	-6,64	172,30	0,75
Julho	1,24	45,12	256,43	0,50
Agosto	0,18	24,98	198,07	0,62
Setembro	6,14	-2,73	235,87	0,70
Outubro	1,16	40,45	284,95	0,66
Novembro	59,23	32,30	341,82	0,49
Dezembro	9,59	15,63	225,80	0,78
Janeiro	16,30	24,05	304,77	0,66
Fevereiro	11,03	138,73	360,17	0,42
Março	13,32	80,04	367,25	0,45

Com os resultados apresentados na Tabela 5 através da análise métrica estatística efetuada da previsão de DNI para as primeiras 24 horas, verifica-se que de um modo geral que a qualidade da previsão é boa, exceto em relação ao RMSE que apresenta

valores elevados. Analisando o MAPE observa-se que o mês de novembro apresenta o erro mais alto com 59,23% seguindo-se de janeiro com 16,3%, por outro lado, agosto é mês com menor erro com 0,18% e de seguida o mês de junho com 0,3%. Ao nível do MBE a maior parte dos meses são sobrestimados havendo apenas dois meses subestimados, junho e setembro. O MBE para o mês de fevereiro apresenta o pior resultado com 138,73 W/m² de DNI a ser sobrestimado, seguindo-se o mês de março com 80,04 W/m². Como melhor resultado do MBE aparecem os meses de junho com -6,64 W/m² e setembro com -2,73 W/m². Quanto ao RMSE este apresenta valores muito elevados para todos os meses, sendo os meses de fevereiro e março os meses com resultados superiores com 360,17 W/m² e 367,25 W/m², respetivamente, enquanto que os meses de junho e agosto apresentam os resultados mais baixos com valores de 172,30 W/m² e 198,07 W/m². O RMSE apresenta valores elevados devido à análise ser mensal e desta englobar um grande número de dias com nebulosidade que afetam em muito o resultado do RMSE. Esta métrica estatística apresenta melhores resultados em dias de céu limpo de nuvens.

Através dos resultados nas correlações lineares verifica-se que as são correlações são fortes para os meses de abril, maio, junho, setembro e dezembro. Para os restantes meses as correlações são moderadas. Apesar de haver dois meses de verão com correlações fortes, seria de esperar que os meses de julho e agosto apresentassem o mesmo tipo de correlação devido a uma menor presença de nuvens nestes meses e um maior número de dias de céu limpo. A correlação nestes meses poderá ter sido afetada pela presença em maior número de aerossóis e de vapor de água na região de Évora. Em junho houve a presença de aerossóis em nove dias e em setembro dez, que resultaram em correlações fortes enquanto que para o mês de julho houve vinte dias com presença de aerossóis e em agosto vinte um dia que afetaram a qualidade da correlação tendo resultado em correlações moderadas.

5.3.2 Previsão de DNI a 48 horas

Com o aumento da previsão horária de DNI é expectável que a qualidade da previsão diminua. No cômputo geral as análises métricas tiveram piores resultados comparadas com as primeiras 24 horas de previsão de DNI através do modelo de radiação do ECMWF (ver Tabela 6).

TABELA 6 - TESTES ESTATÍSTICOS PARA A PREVISÃO A 48 HORAS

Mês	MAPE (%)	MBE (W/m ²)	RMSE (W/m ²)	Correlação
Abril	24,54	57,80	354,66	0,43
Maio	20,04	49,12	292,04	0,61
Junho	1,23	-0,93	251,34	0,44
Julho	1,44	44,04	271,98	0,42
Agosto	1,12	27,25	208,71	0,59
Setembro	52,14	-10,55	337,22	0,37
Outubro	1,67	36,14	322,56	0,54
Novembro	57,09	29,49	337,27	0,50
Dezembro	16,58	32,66	273,16	0,69
Janeiro	17,81	22,37	325,25	0,61
Fevereiro	13,46	153,52	381,39	0,36
Março	15,19	64,41	409,30	0,32

A partir dos resultados obtidos verifica-se que há um aumento no MAPE em todos os meses, continuando a ser o mês de novembro o com o erro maior com 57,09%, apesar de uma diminuição de 2,14%, e com o mês de julho a ter um aumento de 46% em relação às primeiras 24 horas tendo obtido 52,14% de erro. Com a percentagem de erro mais baixa continua a ser o mês de agosto com um erro associado de 1,12% e o mês de junho o segundo melhor mês com um erro de 1,23%. No caso do MBE há uma melhoria no melhor mês de previsão a 24 horas, o mês junho, com uma melhoria de 5,71 W/m² passando a haver uma subestimação de -0,93 W/m² um resultado quase ideal. Fevereiro continua a ser o mês com maior sobrestimação com 153,52 W/m², mais 14,79 W/m² em comparação com a previsão a 24 horas e o mês de março com a segunda maior 64,41% com menos 15,63 W/m² do que a primeira previsão. O RMSE de um modo geral aumentou em todos os meses, expeto no mês de novembro que teve uma diminuição de 4,55%. Os meses de fevereiro e março, como na previsão a 24 horas, continuam a ser os que apresentam valores mais elevados com 381,39 W/m² e 409,3 W/m², respetivamente, e os meses de junho e agosto têm os valores mais baixos, com 251,34 W/m² para o mês de junho e 208,71 W/m² para agosto. O

mês de setembro foi o mês que apresentou um maior aumento com 101,34 W/m² a mais do que a previsão a 24 horas. Em torno das correlações, estas desceram na maior parte dos meses, com a exceção do mês de novembro em que houve um aumento, apesar de mínimo, de 0,01. As correlações passaram a ser correlações moderadas para todos os meses, exceto os meses de setembro, fevereiro e março que são correlações fracas. Os meses de abril e setembro apresentaram as maiores descidas nas correlações em comparação com a previsão a 24 horas, descidas na ordem dos 0,32 para ambos os meses. O mês de junho apresentou uma descida semelhante na ordem dos 0,31.

5.3.3 Previsão de DNI a 72 horas

TABELA 7 - TESTES ESTATÍSTICOS PARA A PREVISÃO A 72 HORAS

Mês	MAPE (%)	MBE (W/m ²)	RMSE (W/m ²)	Correlação
Abril	11,09	-51,44	370,60	0,34
Maio	21,59	48,25	347,56	0,41
Junho	1,43	-0,16	241,58	0,49
Julho	1,38	53,81	261,80	0,46
Agosto	1,09	25,09	199,39	0,63
Setembro	50,27	-19,20	341,62	0,36
Outubro	1,70	59,64	313,27	0,59
Novembro	58,69	7,27	373,30	0,39
Dezembro	11,99	25,63	273,37	0,69
Janeiro	20,72	13,22	329,07	0,60
Fevereiro	15,56	175,07	404,07	0,33
Março	13,28	61,83	403,24	0,33

A qualidade da previsão de DNI a 72 horas realizada pelo modelo de radiação do ECMWF de um modo geral é mais baixa do que os outros períodos horários (ver Tabela 7). No caso do MAPE este aumentou em praticamente em todos os meses do ano, exceto nos meses de novembro e março que apresentam subidas muito pouco significativas na ordem dos 0,54% para novembro e 0,03% para março, em

comparação com as primeiras 24 horas de previsão. Os meses de maio e setembro apresentam as maiores subidas com um aumento de 14,69% e 44,13%, respectivamente. O mês de novembro é o mês com maior MAPE com 58,69%, enquanto que setembro foi o segundo mais alto com um resultado de 50,27%. Como resultado mais baixo aparece o mês de agosto com 1,09% seguindo-se pelo mês de julho com 1,38%. Em comparação com a previsão de DNI a 48 horas verifica-se que há uma diminuição do MAPE na maior parte dos meses, destacando-se o mês de abril com a maior diminuição de 13,45%, enquanto que o maior aumento acontece em janeiro com um valor baixo de 2,91%. No caso do MBE fevereiro é o mês com maior sobrevalorização com 175,07 W/m² e o mês de março é o segundo mês mais sobrevalorizado com o valor 61,83 W/m². Como meses subestimados ocorreram em três meses, o mês de abril, junho e setembro em que se destacam os meses de abril e setembro com subestimações mais elevadas com 51,44 W/m² e 19,20 W/m², respectivamente. O mês de junho é o que apresenta um resultado mais próximo de zero com uma subestimação de 0,16 W/m². Verifica-se que o mês de abril foi sobrevalorizado nas previsões de DNI a 24 e 48 horas e subestimado a 72 horas e que o mês de junho foi sempre subestimado, apesar de serem valores próximos de zero. Comparando o MBE as 48 horas e 72 horas é possível observar que a previsão de DNI a 72 horas apresenta valores mais baixos na maior parte dos meses. Como maior descida aparece o mês de abril com uma descida de 109,24 W/m² seguindo-se pelo mês de novembro com uma diminuição de 22,22 W/m². Em relação ao aumento, destaca-se o mês de outubro com um aumento de 23,50 W/m² e o mês de fevereiro com 21,55 W/m². Os resultados do RMSE tiveram todos um aumento em todos os meses, em comparação às primeiras 24 horas, sendo os meses de abril e maio os meses que obtiveram um maior aumento do RMSE com 139,70 W/m² para o mês de maio e 136,67 W/m² para maio resultando em valores de RMSE de 370,60 W/m² e 374,56 W/m², respectivamente. Comparando com as 48 horas de previsão não se verifica um aumento tão elevado, o maior aumento ocorre em maio com um valor de 55,52 W/m² e o segundo maior em novembro com 36,02 W/m². O mês de julho apresenta uma maior diminuição com o valor de 10,18 W/m² enquanto que junho aparece logo de seguida com uma diminuição de 9,76 W/m². Ao nível das correlações verifica-se uma diminuição em todos os meses, em relação as primeiras 24 horas, e um conseqüente aumento do número de meses com correlações fracas e moderadas

deixando de haver correlações fortes como acontecia nas previsões de DNI a 24 e 48 horas. Os meses de abril, setembro, novembro, fevereiro e março apresentam correlações fracas, enquanto que os restantes meses correlações moderadas. Com o aumento das horas de previsão era expectável que os dados de DNI previstos e medidos tivessem pouco correlacionados. O cenário é diferente em comparação com as 48 horas de previsão de DNI. Os meses de abril, maio, setembro, novembro e fevereiro apresentam correlações mais baixas, com maio a apresentar a maior diminuição com 0,2. Os restantes meses têm correlações superiores com os meses de junho e outubro a apresentarem o maior aumento, apesar de pouco significativo, de 0,05.

5.1. Métricas estatísticas anuais para os três dias de previsão

O comportamento anual das análises métricas estatísticas permite uma observação mais intuitiva e simples da qualidade da previsão de DNI para as diferentes previsões horárias, assim foram efetuados gráficos anuais com a correlação, o MAPE, MBE, RMSE.

5.4.1 Correlação

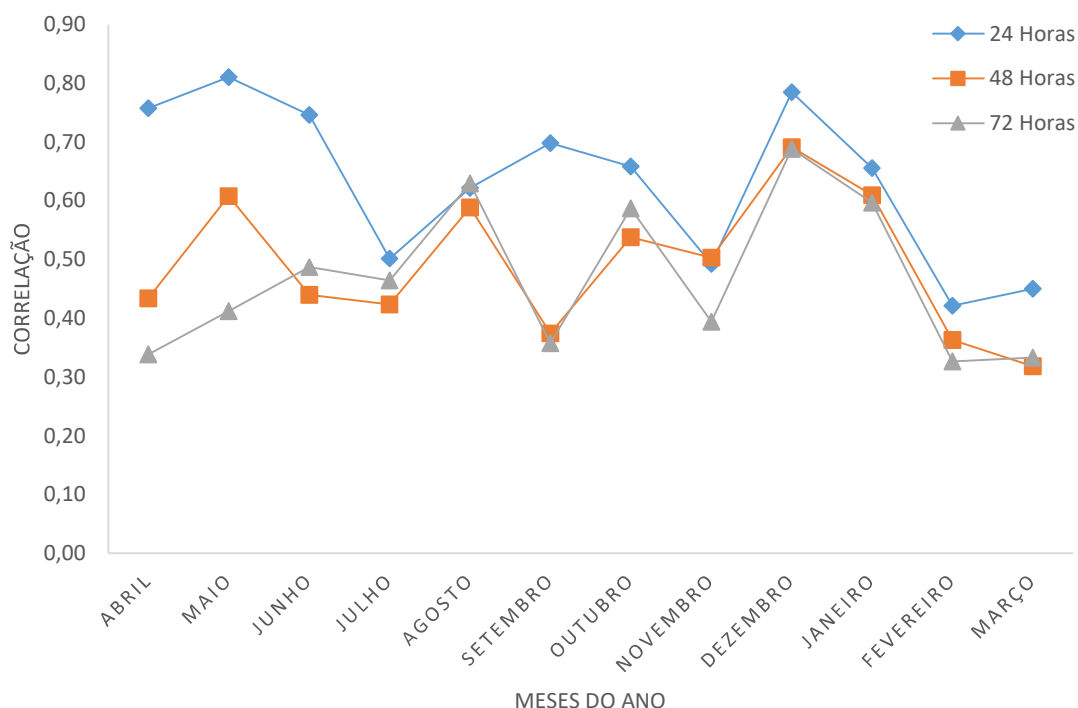


FIGURA 5.37 – CORRELAÇÃO ANUAL

Através da análise da Figura 5.37 verifica-se que no geral com o aumento da previsão horária para a previsão de DNI ocorre uma diminuição na correlação entre os dados previstos e os medidos. Para as 24 horas, os meses de maio e dezembro apresentam as correlações mais fortes e os meses de fevereiro e março apresentam as correlações mais fracas verificando-se esta tendência para as restantes previsões horárias, exceto na previsão a 48 horas para os meses de junho, julho, agosto e setembro em que apresentam resultados inferiores às 72 horas de previsão de DNI.

5.4.2 MAPE

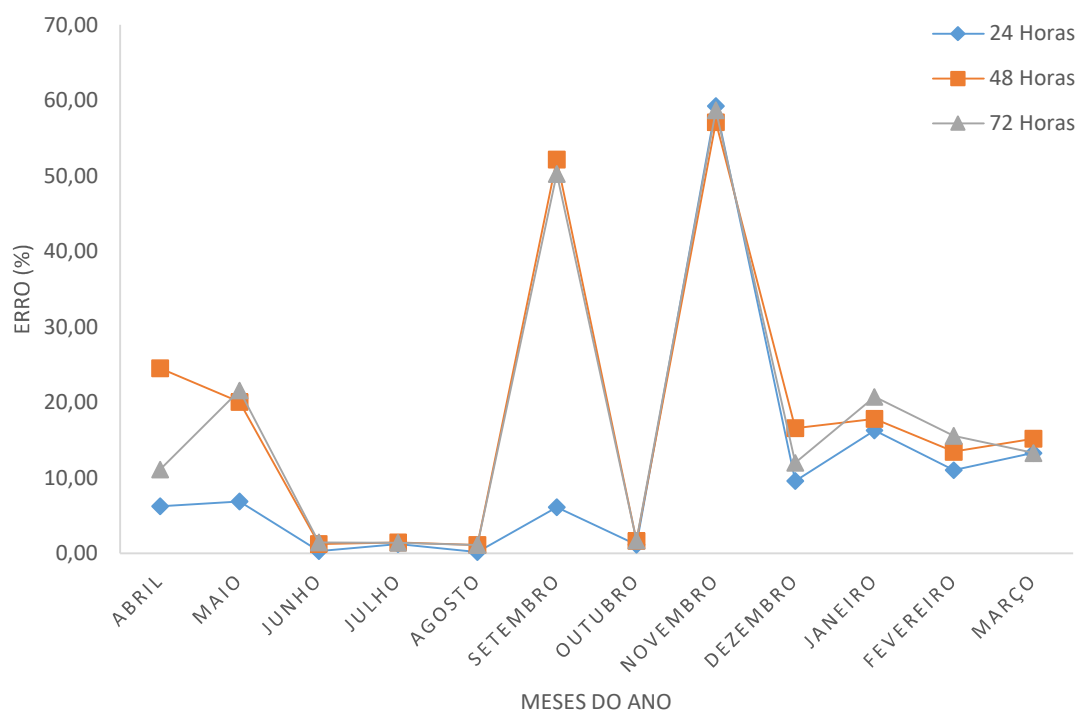


FIGURA 5.38 – MAPE ANUAL

Analisando o MAPE anual para a previsão a 24 horas através da Figura 5.38 é possível aferir que no geral quanto maior for a previsão horária, esta vai ter tendência em diminuir a sua qualidade de previsão de DNI. Observa-se que os meses de junho, julho e agosto e outubro apresentam os resultados com menor percentagem de erro. De realçar que estes meses apresentam um MAPE baixo para as três previsões horárias de DNI. Por outro lado, os meses de novembro e setembro apresentam erros muito elevados que estão associados a erros na previsão do DNI ao nascer e pôr-do-sol que se traduzem em valores perto de zero ou mesmo zero enquanto que nas medições efetuadas no Verney apresenta valores, normalmente, superiores a 100 W/m² nesses períodos.

5.4.3 MBE

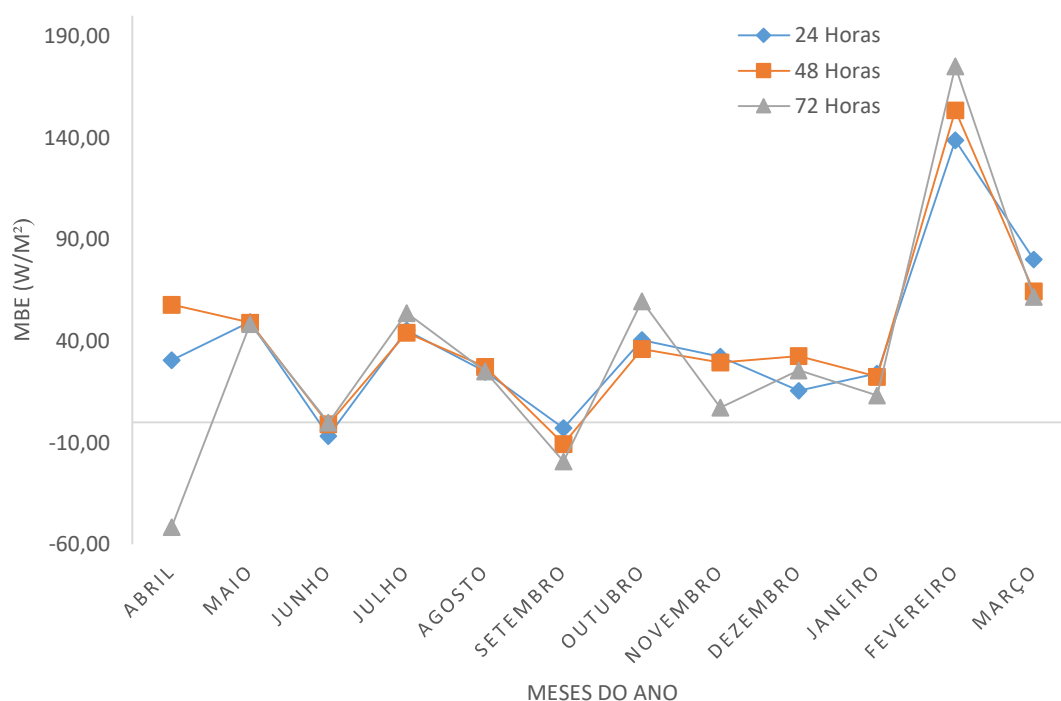


FIGURA 5.39 - MBE ANUAL

O MBE anual para as primeiras 24 horas de previsão apresenta melhores resultados nos meses de junho, setembro e dezembro, enquanto que os meses de fevereiro e março têm os piores resultados (ver Figura 5.39). De notar, que em abril a previsão a 24 e 48 horas são sobrestimadas e para a previsão a 72 horas ocorre uma subestimação e nos meses de novembro, janeiro e março a previsão a 72 horas é a que apresenta melhores resultados. No geral para todos os meses analisados constata-se que no global com o aumento da previsão de DNI há tendência para uma diminuição na qualidade da previsão de radiação.

5.4.4 RMSE

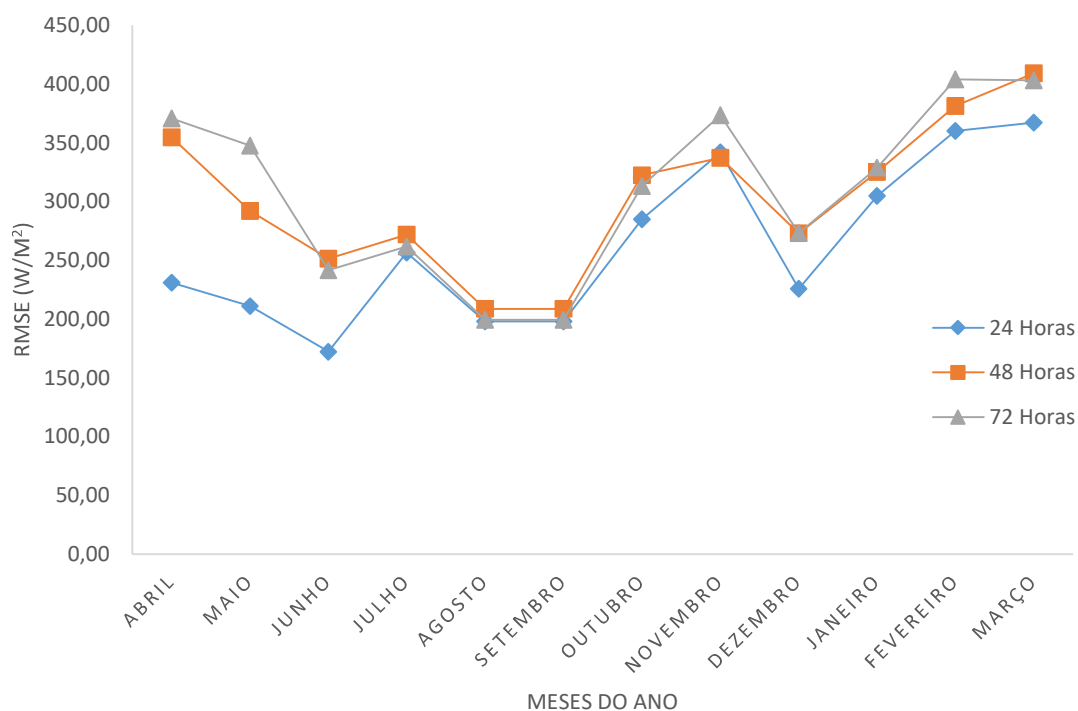


FIGURA 5.40 - RMSE ANUAL

Observando-se a Figura 5.40 verifica-se que o RMSE anual apresenta melhores resultados para a previsão a 24 horas com os meses de junho, agosto, setembro e dezembro a apresentarem valores mais baixos. Como resultados mais altos aparecem os meses de novembro, fevereiro e março. Para as restantes previsões, estas, no geral, seguem a tendência de aumentaram o RMSE com o aumento da previsão de DNI com a exceção do mês de junho e outubro em que a previsão a 72 horas apresenta um resultado inferior às 48 horas.

De todas as análises estatísticas efetuadas, o RMSE é o que apresenta valores mais elevados. Este aumento ocorre por diversas fontes, tais como, a presença de nuvens e de aerossóis na atmosfera que influenciam em muito a qualidade da previsão de DNI. Outro motivo para este acontecimento é o erro associado aos dados previstos, como por exemplo, o modelo prever erradamente quando irá surgir o aparecimento de nuvens em determinada hora. Muitas das vezes à um desfasamento entre o que realmente foi medido e o que é previsto pelo modelo do ECMWF e esse aparecimento destas situações acabam por influenciar o resultado mensal de RMSE.

6. Conclusão

O objetivo do trabalho desenvolvido nesta dissertação vem de encontro com as necessidades decorrentes do nosso planeta e o usufruto de energias limpas como é o caso da radiação solar, pode ser uma alternativa coerente às fontes primárias de energia sendo um recurso com grande disponibilidade na região sul de Portugal ao longo do ano.

O presente trabalho teve como base a avaliar a qualidade da previsão da radiação solar normal direta na região de Évora, através da estação meteorológica instalada no ICT e dos dados fornecidos pelo ECMWF através do seu modelo de radiação durante o período de abril de 2016 a março de 2017.

Analisando todos os meses contata-se que há um maior número de meses em que a previsão de DNI é pouco influenciada, e.g. abril, maio, junho, setembro, dezembro. Nestes meses ocorreram poucos dias com presença de nuvens na atmosfera, possibilitando uma boa qualidade de previsão de DNI. Os meses de julho e agosto devido ao maior número de dias com céu limpo deveriam apresentar resultados mais satisfatórios ao nível da correlação, sendo que o baixo resultado apresentado pode ser explicado pelo alto número de dias com presença de aerossóis e vapor de água na região de Évora. Como resultados em que houve alguma influência, mas que aceitável, na qualidade da previsão de DNI aparecem outubro e janeiro. Os meses com piores resultados, surgem novembro, fevereiro e março com grande predominância de dias com nebulosidade que acabam por ter um maior peso na qualidade da previsão de DNI e ainda o aparecimento em grande quantidade de dias de aerossóis e vapor de água no mês de março, e em novembro de vapor de água. Fevereiro apresenta poucos dias de aerossóis, apesar de ocorrer dois dias com alta presença de aerossóis, e de vapor de água, mas os maus resultados são explicados pela presença de dias com céu muito carregado de nuvens que dificultaram a previsão de DNI através do modelo de radiação do ECMWF.

Os resultados obtidos através do *scatter plot* permitem afirmar que ocorreu um maior número de sobrestimações ao longo dos meses, e que os meses de verão apresentam resultados mais relacionados em comparação com os restantes meses.

Realizando uma média anual de todas as métricas estatísticas estudadas neste trabalho obtém-se uma correlação média de 0,63, um MAPE de 10,97%, um MBE de 39,32% e para o RMSE 262,62 W/m². Estes resultados são animadores e permitem acreditar que num futuro próximo a previsão de radiação solar será mais precisa e fidedigna.

Os valores das medições por satélite apresentam algumas incertezas ao nascer e pôr-de-sol que podem ser explicadas pelos grandes ângulos de incidência e pelo fato de algumas vezes as imagens de satélite serem tiradas quando o sol está abaixo da linha do horizonte, mas ocorrendo radiação durante essa hora. Um bom exemplo é o nascer do sol ser às 6:30 e a imagem de satélite ser tirada às 6:15, assim não será registada radiação para esse período de tempo quando na realidade há GHI entre as 6:30 e as 7:00. Os erros associados a estas mediações são pequenos e acabam por ter pouco efeito nos dados, mas é importante perceber as limitações dos valores dos dados usados.

O erro com maior influência que decorre durante a previsão de radiação solar surge a partir da deteção imprecisa das nuvens ou a determinação da sua altura porque cada uma afeta a precisão de determinar onde determinada nuvem irá ou não obstruir determinada localização. Uma das melhorias a realizar no modelo de radiação para diminuição dos erros de previsão será uma efetuar uma determinação mais eficaz da geometria das nuvens e a sua localização exata. O conhecimento mais aprofundado da previsão de vapor de água, aerossóis e de ozono, bem como um melhor conhecimento do terreno também são importantes para a diminuição dos erros de previsão de radiação solar.

A elaboração deste estudo tem um papel preponderante para a região de Évora na área da energia solar, que apesar de já ter, terá ainda mais importância futura na implementação de tecnologias com recurso a energia solar e permitirá dar novas ferramentas para futuras empresas interessadas em investir na criação de centrais fotovoltaicas ou térmicas.

7. Referências

- [1] Perdigão, J.C., Salgado, R., Costa, M.J., Dasari, H.P. and Sanchez-Lorenzo, 2016, Variability and trends of downward surface global solar radiation over the Iberian Peninsula based on ERA-40 reanalysis.
- [2] Perdigão, J.C., Salgado, R., Magarreiro, C., P. M. M. Soares, Costa, M.J, Prasad Dasari, H., 2017, An Iberian climatology of solar radiation obtained from WRF regional climate simulations for 1950–2010 period. Atmospheric Research. Volume 198, 1 December 2017, Pages 151-162.
- [3] Jornal I, [Online]. Disponível em: <https://ionline.sapo.pt/543837>. [Acedido a 30 de Março 2017].
- [4] T. Haiden, M. Janousek, J. Bidlot, L. Ferranti, F. Prates, F. Vitart, P. Bauer and D.S. Richardson, 2016, Evaluation of ECMWF forecasts, including the 2016 resolution upgrade.
- [5] “Constante solar,” [Online]. Disponível em: <http://www.climate4you.com/Sun.htm> [Acedido em 19 Janeiro de 2017].
- [6] C. J. Chen, Physics of Solar Energy, John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [7] Energy Information Administration, "INTERNATIONAL ENERGY OUTLOOK 2016 - With Projections to 2040", 2016.
- [8] Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaica - 2ª Edição, 2015.
- [9] “Energia Solar,” [Online]. Disponível em: <https://www.electronica-pt.com/content/view/18/> [Acedido em 17 Janeiro de 2017].
- [10] S. Kalogirou, Solar energy engineering: processes and systems, California: Elsevier’s Science & Technology, 2009.
- [11] Jeffrey R. S. Brownson, Solar Energy Conversion Systems. Oxford: Elsevier-Academic Press, 2014.
- [12] Vignola, F., Michalsky, D., Stoffel T., Solar and Infrared Radiation Measurements, FLORIDA: CRC Press (2012).
- [13] Kipp & Zonen, “Kipp & Zonen,” [Online]. Disponível em:

<http://www.kippzonen.com/Product/276/CMP10-Pyranometer>. [Acedido a 5 de Março 2017].

[14] Kipp & Zonen, “Kipp & Zonen,” [Online]. Disponível em:

<http://www.kippzonen.com/Product/20/SOLYS2-Sun-Tracker>. [Acedido a 5 de Março 2017].

[15] Handbook of concentrator photovoltaic technology Hoboken : John Wiley & Sons Inc., 2016.

[16] Kipp & Zonen, “Kipp & Zonen,” [Online]. Disponível em: <http://www.kippzonen.com/Product/20/SOLYS2-Sun-Tracker#.Wba--MiGPIU>. [Acedido a 5 de Março 2017].

[17] Kleissl J., Solar Energy Forecasting and Resource Assessment. California, EUA. Academic Press, 2013.

[18] Shettle EP. Models of aerosols, clouds, and precipitation for atmospheric propagation studies. Copenhagen, Denmark: AGARD Conference proceedings; 1989.

[19] Molineaux B, Ineichen P, O'Neill N. Equivalence of pyrheliometric and monochromatic aerosol optical depths at a single key wavelength. Applied optics. 1998;37(30):7008–7018.

[20] Ineichen P. A broadband simplified version of the SOLIS clear sky model. Solar Energy. 2008;82(8):758–762.

[21] Nasa Earth Observatory. (s.d.). Weather forecasting through the ages. Disponível em: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/WxForecasting/wx2.php>. [Acedido a 3 de Dezembro 2016].

[22] “NOAA 200th Anniversary Celebration,” [Online]. Disponível em: <https://celebrating200years.noaa.gov/>. [Acedido a 3 de Dezembro 2016].

[23] Nasa Earth Observatory. (s.d.). Vilhelm Bjerknes (1862-1951). Disponível em: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Bjerknes/>. [Acedido a 3 de Dezembro 2016].

- [24] Nasa Earth Observatory (s.d.). Weather forecasting through the ages. Disponível em: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/WxForecasting/wx3.php>. [Acedido a 3 de Dezembro 2016].
- [25] Courant, R., Friedrichs, K. O., and Lewy, H. (1928). Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik. *Math. Annalen*, 100, 32–74. [On the partial difference equations of mathematical physics, English translation by Fox, P. (1967), *IBM Journal*, 11, 215–34.].
- [25] Encyclopædia Britannica. (s.d.). Carl-Gustaf Arvid Rossby. Disponível em: <https://www.britannica.com/biography/Carl-Gustaf-Arvid-Rossby>. [Acedido em 25 Janeiro de 2017].
- [26] Charney, J. G. (1948). On the scale of atmospheric motions. *Geophys. Publ.* 17, 1–17.
- [27] “UCD School of Mathematics and Statistics”. Disponível em: <http://mathsci.ucd.ie/~plynch/Dream/ForecastFactory/SchuitenHD3.jpg>. [Acedido em 17 Janeiro de 2017].
- [28] Platzman, G. W. (1979). The ENIAC computation of 1950. Gateway to numerical weather prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 60, 302–12.
- [29] Nasa Earth Observatory. (s.d.). Weather forecasting through the ages. Disponível em: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/WxForecasting/wx4.php>. [Acedido a 9 de Dezembro 2016].
- [30] The History of Numerical Weather Prediction. (s.d.). Disponível em: http://celebrating200years.noaa.gov/foundations/numerical_wx_pred/welcome.html#content. [Acedido a 9 de Dezembro 2016].
- [31] Coiffier, Jean (2011), *Fundamentals of Numerical Weather Prediction*
- [32] Diagne, M., M. David, P. Lauret, J. Boland, and N. Schmutz, 2013: Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 65-76
- [33] R.H. Inman, H.T.C. Pedro, C.F.M. Coimbra, Solar forecasting methods for renewable energy integration, *Prog. Energy Combust. Sci.* 39 (6) (2013) 535-576

- [34] Y. Chu, H.T.C. Pedro, C.F.M. Coimbra, Hybrid intra-hour DNI forecasts with sky image processing enhanced by stochastic learning, *Sol. Energy* 98 (2013) 592-603.
- [35] G.K. Singh, Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: a review, *Energy* 53 (2013) 1-13.
- [36] Y. Chu, B. Urquhart, S.M.I. Gohari, H.T.C. Pedro, J. Kleissl, C.F.M. Coimbra, Shortterm reforecasting of power output from a 48 MWe solar PV plant, *Sol. Energy* 112 (2015) 68-77.
- [37] Lorenz, E., Kühnert, J., Heinemann, D.: Overview of Irradiance and Photovoltaic Power Prediction, In: *Weather Matters for Energy*, Editors: A. Troccoli, L. Dubus, S.E. Haupt (Springer 2014).
- [38] Jeffrey R. S. Brownson, *Solar Energy Conversion Systems*. Oxford: Elsevier-Academic Press, 2014.
- [39] Lorenz, E., Kühnert, J., Heinemann, D.: Overview of Irradiance and Photovoltaic Power Prediction, In: *Weather Matters for Energy*, Editors: A. Troccoli, L. Dubus, S.E. Haupt (Springer 2014).
- [40] ECMWF [Online]. Disponível em: <http://www.ecmwf.int/en/about/who-we-are/history>. [Acedido a 15 de Março 2017].
- [41] ECMWF [Online]. Disponível em: <https://www.ecmwf.int/en/about/what-we-do>. [Acedido a 16 de Março 2017].
- [42] Morcrette, J.-J., and Coauthors, 2007: Recent advances in radiation transfer parameterizations. ECMWF Tech. Memo. 539, 52 pp.
- [43] Mlawer, E., and S. Clough, 1997: Shortwave and longwave enhancements in the Rapid Radiative Transfer Model. Proc. Seventh Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting, San Antonio, TX, U.S. Department of Energy, 409–413.
- [44] Slingo, A., 1989: A GCM parameterization for the shortwave radiative properties of water clouds. *J. Atmos. Sci.*, 46, 1419–1427.

- [45] Martin, G. M., D. W. Johnson, and A. Spice, 1994: The measurement and parameterization of effective radius of droplets in warm stratocumulus. *J. Atmos. Sci.*, 51, 1823–1842.
- [46] Sun, Z., 2001: Reply to comments by G.M. McFarquhar on “Parametrization of effective sizes of cirrus-cloud particles and its verification against observations.” *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127A, 267–271.
- [47] Fu, Q., 1996: An accurate parameterization of the solar radiative properties of cirrus clouds for climate models. *J. Climate*, 9, 2058–2082.
- [48] Fu, Q., P. Yang, and W. B. Sun, 1998: An accurate parameterization of the infrared radiative properties of cirrus clouds for climate models. *J. Climate*, 11, 2223–2237.
- [49] Slingo, A., 1989: A GCM parameterization for the shortwave radiative properties of water clouds. *J. Atmos. Sci.*, 46, 1419–1427.
- [50] Lindner, T. H., and J. Li, 2000: Parameterization of the optical properties for water clouds in the infrared. *J. Climate*, 13, 1797–1805.
- [51] Tiedtke, M., 1993: Representation of clouds in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 3040–3061.
- [52] Jakob, C., 2000: The representation of cloud cover in atmospheric general circulation models. Ph.D. thesis, University of Munich, 193 pp.
- [53] Jakob, C., and S. A. Klein, 2000: A parametrization of the effects of cloud and precipitation overlap for use in general circulation models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 2525.
- [54] Tompkins, A. M., C. Cardinali, J.-J. Morcrette, and M. Rodwell, 2005: Influence of aerosol climatology on forecasts of the African Easterly Jet. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L10801.
- [55] Shettle EP. Models of aerosols, clouds, and precipitation for atmospheric propagation studies. Copenhagen, Denmark: AGARD Conference proceedings; 1989.
- [56] Molineaux B, Ineichen P, O’Neill N. Equivalence of pyr heliometric and monochromatic aerosol optical depths at a single key wavelength. *Applied optics*. 1998;37(30):7008–7018.

[57] Ineichen P. A broadband simplified version of the SOLIS clear sky model. *Solar Energy*. 2008;82(8):758–762.

[58] H. Robin, Radiation Quantities in the ECMWF model and MARS.

[59] K. Ulgen e A. Hepbasli, “Diffuse solar radiation estimation models for Turkey's big cities,” Elsevier, 2008.

[60] Larson, Ron; Farber, Betsy. *Estatística aplicada*. 4 ed. São Paulo: Pearson, 2010. 637 p.

[61] NASA Earth Observations. Disponível online em: <https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/>. [Acedido a 5 de Janeiro 2018].