



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Avaliação do Recurso Solar e Modelação de um Sistema de Energia Fotovoltaica Ligado à Rede Eléctrica da Ilha da Madeira

Edgar Francisco Mendes Abreu

Orientação:

Doutor Paulo Manuel Ferrão Canhoto

Doutor Mário Rui Melício da Conceição

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Évora, Abril de 2016

**Avaliação do Recurso Solar e Modelação de um Sistema de
Energia Fotovoltaica Ligado à Rede Elétrica
da Ilha da Madeira**

Dissertação realizada em regime de coorientação sob orientação do

Doutor Paulo Manuel Ferrão Canhoto

e sob orientação do

Doutor Mário Rui Melício da Conceição

Respetivamente, Professor Auxiliar

e

Professor Auxiliar com Agregação

Departamento de Física

Escola de Ciências e Tecnologia

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

Resumo

Esta dissertação consiste na determinação do ano meteorológico típico para vários locais da ilha da Madeira, na modelação de um sistema fotovoltaico e respetiva estimativa de produção de energia elétrica. O ano meteorológico típico foi determinado através de um algoritmo em Matlab desenvolvido com esse propósito, tendo sido usadas séries de dados de radiação solar, temperatura, humidade e intensidade do vento. A modelação da célula fotovoltaica foi baseada no modelo de um díodo, i.e., modelo de três parâmetros, implementado em Matlab e validado através de valores fornecidos por fabricantes. A estimativa da produção de energia foi feita usando o ano meteorológico típico obtido, tendo sido utilizado o ArcGIS Pro para elaborar um mapa da ilha com essa estimativa. Foi obtido um valor máximo de produção de 1922.1 horas à potência de pico na zona do Areeiro e um valor de 1672.1 horas na zona do Funchal, ilha da Madeira, Portugal.

Palavras-Chave

Ano Meteorológico Típico

Energia Solar

Sistema Fotovoltaico

Modelação e Simulação

Abstract

Solar Resource Assessment and Modelling of a Photovoltaic System Linked to Madeira Island's Electric Grid

This dissertation consists on determining a typical meteorological year for several locations in Madeira Island, on a PV system modelling and on the power production estimate. The typical meteorological year construction was done with the help of a Matlab algorithm, developed for this purpose, and it's based on data series of solar radiation, temperature, relative humidity and wind velocity. The PV cell modelling was based on one diode, i.e., three parameters model, implemented with a Matlab model algorithm and validated through the manufacturer's data. The power production estimate was done through the typical meteorological year obtained, and ArcGIS Pro was used to generate a map with that estimate. The higher production value was 1922.1 hours at peak power, obtained in Areeiro, and it was obtained a value of 1672.1 hours at peak power in Funchal, Madeira Island, Portugal.

Keywords

Typical Meteorological Year

Solar Energy

PV System

Modelling and Simulation

Agradecimentos

Ao meu orientador Doutor Paulo Manuel Ferrão Canhoto, expresso o meu agradecimento por todo o tempo despendido, pela paciência, pela constante disponibilidade, pela transmissão de valiosos conhecimentos e por toda a ajuda prestada durante a elaboração desta dissertação.

Ao meu orientador Doutor Mário Rui Melício da Conceição, expresso o meu agradecimento pela disponibilidade, pela transmissão de valiosos conhecimentos, pelo fornecimento de documentação e por toda a ajuda prestada durante a elaboração desta dissertação.

Aos meus pais, Francisco Abreu e Irene Abreu, expresso o meu profundo agradecimento por estarem sempre presentes, por toda a força e motivação e por todo o esforço e sacrifício que tornaram possível a realização deste curso. Ao meu irmão, Sérgio Abreu, expresso o meu agradecimento pelas palavras de motivação.

À minha madrinha, Fátima Mendes, expresso o meu profundo agradecimento pela sua constante presença, pelos seus conselhos e por toda a força e motivação.

À minha namorada, Joana Gralha, expresso o meu agradecimento por todas as palavras de apoio, por toda a paciência e carinho e pelo auxílio prestado.

Ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera, na pessoa do Doutor Victor Prior, expresso o meu agradecimento pela cedência das medições das diferentes grandezas meteorológicas estudadas durante a realização desta dissertação.

À Empresa da Eletricidade da Madeira, expresso o meu agradecimento pela cedência da energia emitida para a rede no ano de 2014 e pela informação acerca do sistema de produção de energia elétrica da ilha.

Aos meus amigos e colegas da Universidade de Évora, expresso o meu agradecimento pela partilha de conhecimentos, pela amizade e pelo companheirismo construído ao longo destes anos.

Índice

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Nomenclatura.....	xv
Acrónimos.....	xviii
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Motivação	2
1.4. Estado da Arte.....	3
1.5. Estrutura da Dissertação	7
1.6. Notação	7
Capítulo 2 - Determinação do Ano Médio e do Ano Meteorológico Típico	9
2.1. Filtragem, Validação e Correção dos Dados.....	9
2.1.1. Dimensão da amostra de dados utilizada	9
2.1.2. Filtragem da radiação solar global e correção da radiação difusa.....	10
2.1.3. Filtragem dos dados de temperatura máxima e mínima.....	13
2.1.4. Humidade relativa do ar e Intensidade média do vento	13
2.2. Preenchimento de Lacunas nas Séries de Dados	14
2.2.1. Radiação solar global	14
2.2.2. Radiação difusa	16
2.2.3. Temperatura, Humidade Relativa e Intensidade do Vento	17
2.2.4. Cálculo de médias e extremos.....	19
2.3. Determinação do Ano Médio.....	20
2.3.1. Metodologia	20
2.3.2. Resultados	20
2.4. Determinação do Ano Meteorológico Típico (AMT).....	22
2.4.1. Metodologia e respetiva aplicação	22
2.4.2. Validação do Ano Meteorológico Típico.....	31
2.4.3. Resultados	33

Capítulo 3 - Modelação do Sistema Fotovoltaico.....	35
3.1. Modelação.....	35
3.2. Aplicação do Modelo.....	39
3.3. Algoritmo de Simulação.....	41
3.3.1. Efeito da Temperatura da Célula e da Radiação Solar Incidente.....	42
3.3.2. Determinação da Temperatura da Célula.....	43
3.4. Validação do Modelo.....	45
Capítulo 4 - Estimativa da Produção de Energia Usando o AMT.....	51
4.1. Determinação da Radiação Solar Incidente num Plano Inclinado.....	51
4.2. Estimativa da Produção de Energia Elétrica.....	52
4.3. Validação do Método Utilizado para a Radiação Difusa.....	58
Capítulo 5 - Distribuição Espacial da Radiação Solar e da Produção de Energia.....	59
5.1. Radiação Solar Global Total Anual.....	59
5.2. Número de Horas Equivalentes à Potência de Pico.....	60
Capítulo 6 - Conclusões.....	63
6.1. Lista de Publicações.....	64
Referências.....	65
Anexos.....	71
Anexo I – Ano médio.....	73
Anexo II – Ano Meteorológico Típico.....	81
Anexo III – Validação do Ano Meteorológico Típico.....	83

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Distribuição da potência instalada na ilha da Madeira em 2014 em função da fonte.	2
Figura 1.2 – Produção de energia elétrica na ilha da Madeira em 2014 [2].	3
Figura 2.1 - Distribuição espacial das estações meteorológicas na ilha da Madeira.	10
Figura 2.2 – Correlação da radiação solar global (valores totais diários) entre a estação do Observatório e a estação do Lido.	14
Figura 2.3 – Correlação da radiação solar global (valores totais diários) entre a estação do Lido e a estação do Lugar de Baixo.	15
Figura 2.4 – Interpolação diária para o dia 06/12/2006 na estação do Observatório.	15
Figura 2.5 – Correlação da temperatura média do ar entre a estação do Observatório e a estação do Lido.	17
Figura 2.6 – Correlação da humidade relativa média do ar entre a estação do Observatório e a estação do Lido.	18
Figura 2.7 – Correlação da intensidade média do vento entre a estação do Observatório e a estação do Lido.	18
Figura 2.8 – Ano médio de radiação solar global na estação do Observatório.	20
Figura 2.9 – Ano médio de radiação difusa na estação do Observatório.	21
Figura 2.10 - Ano médio de radiação solar global na estação de São Jorge.	21
Figura 2.11 - Ano médio de radiação solar global na estação do Areeiro.	21
Figura 2.12 - Sequência de procedimentos para a determinação do AMT.	22
Figura 2.13 – Comparação entre as CDF para a radiação solar global na estação do Observatório.	25
Figura 2.14 – Comparação entre as CDF para a temperatura média do ar na estação do Observatório.	26
Figura 2.15 – Comparação entre CDF para a humidade relativa média do ar na estação do Observatório.	27
Figura 2.16 – Comparação entre CDF para a intensidade média do vento na estação do Observatório.	28
Figura 2.17 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e o AMT da radiação solar global na estação do Observatório.	31
Figura 2.18 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e o AMT da radiação solar global na estação de São Jorge.	32
Figura 2.19 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e o AMT da radiação solar global na estação do Areeiro.	32
Figura 2.20 - Radiação solar global do AMT na estação do Observatório.	33
Figura 2.21 - Radiação difusa do AMT na estação do Observatório.	33
Figura 2.22 - Radiação solar global do AMT na estação de São Jorge.	34

Figura 2.23 - Radiação solar global do AMT na estação do Areeiro.....	34
Figura 3.1 - Circuito elétrico equivalente do modelo de três parâmetros.....	35
Figura 3.2 - Algoritmo de simulação da produção de energia.....	41
Figura 3.3 - Efeito do aumento da temperatura numa célula fotovoltaica.	42
Figura 3.4 - Efeito da variação da radiação solar incidente numa célula fotovoltaica. ...	43
Figura 3.5 - Comparação entre modelos para determinação da temperatura da célula. .	44
Figura 3.6 - Validação do modelo de três parâmetros para o módulo 1.....	47
Figura 3.7 - Validação do modelo de três parâmetros para o módulo 2.....	47
Figura 3.8 - Validação do modelo de três parâmetros para o módulo 3.....	47
Figura 3.9 - Validação do modelo de três parâmetros para o módulo 4.....	48
Figura 3.10 - Validação do modelo de três parâmetros para o módulo 5.....	48
Figura 4.1 - Radiação incidente no plano horizontal e no plano inclinado.	52
Figura 4.2 - Otimização da inclinação dos módulos fotovoltaicos para a estação do Observatório.	53
Figura 4.3 - Fator de produção, Y_F , para a estação do Observatório.	54
Figura 4.4 - Fator de produção, Y_F , para a estação do Areeiro.....	54
Figura 4.5 - Fator de produção, Y_F , para a estação de São Jorge.....	54
Figura 4.6 – Y_F horário médio mensal para a estação do Observatório.	55
Figura 4.7 – Y_F horário médio mensal para a estação do Areeiro.	56
Figura 4.8 – Y_F horário médio mensal para a estação de São Jorge.	56
Figura 4.9 - Variação anual do PR mensal para a estação do Observatório.....	57
Figura 4.10 - Variação anual do PR mensal para a estação do Areeiro.	58
Figura 4.11 - Variação anual do PR mensal para a estação de São Jorge.	58
Figura 5.1 – Distribuição espacial da radiação solar global total anual na ilha da Madeira.59	
Figura 5.2 – Distribuição espacial do fator de produção, Y_F , na ilha da Madeira.	60
Figura I.1 - Ano médio de radiação solar global na estação do Caniçal.	73
Figura I.2 - Ano médio de radiação solar global na estação do Lido.....	73
Figura I.3 - Ano médio de radiação solar global na estação do Lugar de Baixo.....	73
Figura I.4 - Ano médio de radiação solar global na estação do Lombo da Terça.	74
Figura I.5 - Ano médio de radiação solar global na estação da Ponta do Pargo.	74
Figura I.6 - Ano médio de temperatura média do ar na estação do Observatório.	75
Figura I.7 - Ano médio de temperatura média do ar na estação do Areeiro.....	75
Figura I.8 - Ano médio de temperatura média do ar na estação de São Jorge.	75
Figura I.9 - Ano médio de temperatura média do ar na estação do Caniçal.....	75
Figura I.10 - Ano médio de temperatura média do ar na estação do Lido.	76

Figura I.11 - Ano médio de temperatura do ar na estação do Lugar de Baixo.....	76
Figura I.12 - Ano médio de temperatura média do ar na estação do Lombo da Terça. .	76
Figura I.13 - Ano médio de temperatura média do ar na estação da Ponta do Pargo.....	76
Figura I.14 - Ano médio de intensidade média do vento na estação do Observatório...	77
Figura I.15 - Ano médio de intensidade média do vento na estação do Areeiro.....	77
Figura I.16 - Ano médio de intensidade média do vento na estação de São Jorge.....	78
Figura I.17 - Ano médio de intensidade média do vento na estação do Caniçal.....	78
Figura I.18 - Ano médio de intensidade média do vento na estação do Lido.	78
Figura I.19 - Ano médio de intensidade média do vento na estação do Lugar de Baixo.	78
Figura I.20 - Ano médio de intensidade média do vento na estação do Lombo da Terça.	79
Figura I.21 - Ano médio de intensidade média do vento na estação da Ponta do Pargo.	79
Figura II.1 – Radiação solar global do AMT na estação do Caniçal.....	81
Figura II.2 - Radiação solar global do AMT na estação do Lido.	81
Figura II.3 - Radiação solar global do AMT na estação do Lugar de Baixo.....	81
Figura II.4 - Radiação solar global do AMT na estação do Lombo da Terça.	82
Figura II.5 - Radiação solar global do AMT na estação da Ponta do Pargo.	82
Figura III.1 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da temperatura média do ar na estação do Observatório.....	83
Figura III.2 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação do Observatório.....	83
Figura III.3 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da temperatura média do ar na estação de São Jorge.	84
Figura III.4 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação de São Jorge.	84
Figura III.5 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação de São Jorge.	84
Figura III.6 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação do Areeiro.....	84
Figura III.7 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da radiação solar global na estação do Caniçal.....	84
Figura III.8 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da temperatura média do ar na estação do Caniçal.	84
Figura III.9 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação do Caniçal.....	85
Figura III.10 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da radiação solar global na estação do Lido.	85
Figura III.11 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da temperatura média do ar na estação do Lido.	85

Figura III.12 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação do Lido.	85
Figura III.13 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da radiação solar global na estação do Lugar de Baixo.	85
Figura III.14 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da temperatura média do ar na estação do Lugar de Baixo.	85
Figura III.15 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação do Lugar de Baixo.	86
Figura III.16 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da radiação solar global na estação do Lombo da Terça.	86
Figura III.17 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da temperatura média do ar na estação do Lombo da Terça.	86
Figura III.18 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação do Lombo da Terça.	86
Figura III.19 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da radiação solar global na estação da Ponta do Pargo.	86
Figura III.20 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da temperatura média do ar na estação da Ponta do Pargo.	86
Figura III.21 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação da Ponta do Pargo.	87
Figura III.22 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da humidade relativa média do ar na estação do Observatório.	87

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Estações meteorológicas analisadas, respectiva localização e amostra de dados.....	9
Tabela 2.2 – Filtros de qualidade utilizados na estação de Cabauw.....	10
Tabela 2.3 – Valor de K_d de acordo com a ocorrência de nuvens.....	12
Tabela 2.4 – Filtro de temperatura e percentagem total de falhas.....	13
Tabela 2.5 – Percentagem de dados gerados em cada estação em relação à amostra total de dados.....	19
Tabela 2.6 – Pesos estatísticos para a determinação do AMT.....	24
Tabela 2.7 – Valores de FS para a radiação solar global na estação do Observatório...	29
Tabela 2.8 – Soma ponderada WS para a estação do Observatório.....	30
Tabela 2.9 – $RMSD$ para a estação do Observatório.....	30
Tabela 2.10 – Determinação do AMT das diferentes estações analisadas.....	31
Tabela 3.1 – Condições STC e NOCT.....	45
Tabela 3.2 - Características dos módulos fotovoltaicos para a validação do modelo de um díodo e três parâmetros em condições STC.....	46
Tabela 3.3 - Características dos módulos fotovoltaicos para a validação do modelo de um díodo e três parâmetros em condições NOCT.....	46
Tabela 3.4 - Outras características dos módulos fotovoltaicos para validação do modelo.....	46
Tabela 3.5 - Desvios de potência do modelo de um díodo e três parâmetros para condições STC.....	49
Tabela 3.6 - Desvios de potência do modelo de um díodo e três parâmetros para condições NOCT.....	49
Tabela 4.1 - Valores de inclinação e Y_F anual ideais para os locais analisados.....	53
Tabela 5.1 - Comparação da radiação solar total anual, H_T , e do fator Y_F para os anos de 2014 e AMT.....	61

Nomenclatura

Símbolos

Símbolo	Grandeza/Unidade	Definição
A		Matriz dia juliano/hora
A_M	m^2	Área útil do módulo
b	m	Largura da banda
D		Módulo da diferença entre a CDF de longo prazo e a CDF do mês candidato
d	W/m^2	Diferença entre a radiação solar horária do mês candidato e a radiação solar média horária de longo prazo
G	W/m^2	Radiação solar incidente na célula/módulo
G_B	W/m^2	Radiação solar direta horizontal
G_D	W/m^2	Radiação solar difusa horizontal
G_t	W/m^2	Radiação solar incidente no plano inclinado; Radiação solar total incidente no módulo
H	W/m^2	Radiação solar global média diária mensal à superfície
h	°	Ângulo horário
h_a	hora	Hora solar aparente
H_0	J/m^2	Radiação solar global média diária mensal no topo da atmosfera
H_d	W/m^2	Radiação solar difusa média diária mensal
H_T	W/m^2	Radiação solar global total anual
i		Dia Juliano
I_0	A	Corrente inversa de saturação do diodo
I_d	W/m^2	Radiação solar difusa horária
I_{MP}	A	Corrente de máxima potência
I_s	A	Corrente gerada por efeito fotovoltaico
I_{SC}	A	Corrente de curto-circuito
j		Hora do dia

K	J/K	Constante de Boltzman
K'		Correção a ser aplicada às medições de radiação solar difusa
K_d		Fator total a ser aplicado às medições de radiação solar difusa
L	°	Latitude do local
LL	°	Longitude do local
m		Fator de idealidade do diodo
N		Número de dias do mês
n	hora	Número de horas do dia em que a radiação solar é superior a zero
N_s		Número de células do módulo
P	W	Potência de saída da célula/módulo
P_{MP}	W	Potência máxima da célula/módulo
P_p	W	Potência de pico
q	C	Carga do eletrão
R	cm	Raio da banda
R_B		Fator de inclinação
SL	°	Longitude do meridiano de referência
S_a	W/m ²	Radiação solar no topo da atmosfera
$S_{N(x)}$		Função cumulativa distributiva
T	°C	Temperatura
T_a	°C	Temperatura ambiente
T_c	°C	Temperatura na célula/módulo
T_M	°C	Temperatura usada por Mattei
U_{PV}	m/s	Modelo linear da intensidade do vento
V	m/s	Intensidade do vento
V_{MP}	V	Tensão de máxima potência
V_{OC}	V	Tensão de circuito aberto
V_T	J/C	Potencial térmico

w		Peso estatístico da grandeza meteorológica
WS		Soma ponderada das FS's
x		Medição de uma grandeza meteorológica
X	W/m^2	Radiação Solar Difusa Bloqueada
Y_F	Hora ou Wh/Wp	Número de horas de sol equivalentes à potência de pico ou Fator de Produção
Y_R	hora	Fator de referência

Símbolos Gregos

Símbolo	Grandeza/Unidade	Definição
α	$A/^{\circ}C$	Coefficiente de temperatura da corrente de curto-circuito
β	$^{\circ}$	Inclinação dos módulos
γ	$W/^{\circ}C$	Coefficiente de temperatura da potência máxima
δ	$^{\circ}$	Declinação
ΔT	$^{\circ}C$	Intervalo de Temperatura
ε	eV	Hiato do semicondutor
η_{inv}		Eficiência do inversor
θ	$^{\circ}$	Ângulo de incidência da radiação solar
μ_m		Eficiência da célula
μ_o		Cosseno do Ângulo de Zénite
ρ_G		Albedo do chão
$\tau\alpha$		Transmissividade x Absortividade
Φ	$^{\circ}$	Ângulo de Zénite
ψ_s	$^{\circ}$	Azimute ao nascer do sol
ω	$^{\circ}$	Ângulo horário a meio da hora
ω_s	$^{\circ}$	Ângulo horário de pôr-do-sol

Índices inferiores

Símbolo	Definição
c	Índice indicativo da medição de uma determinada grandeza meteorológica
k	Índice indicativo da CDF do mês candidato
m	Índice indicativo da radiação solar média horária do mês candidato
p	Índice indicativo da grandeza meteorológica
r	Índice indicativo de que os parâmetros são para condições de referência

Acrónimos

AMT	Ano Meteorológico Típico
BSRN	<i>Baseline Solar Radiation Network</i>
CDF	<i>Cumulative Distributive Function</i>
EEM	Empresa de Eletricidade da Madeira
FS	Estatística de Finkelstein-Schafer
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
MMT	Mês Meteorológico Típico
NOCT	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>
PR	<i>Performance Ratio</i>
RGBL	Radiação solar global
RMSD	<i>Root Mean Square Difference</i>
R.S.U.	Resíduos Sólidos Urbanos
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>
TRY	<i>Test Reference Year</i>
TSRY	<i>Typical Solar Radiation Year</i>
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>

Capítulo 1 - Introdução

Neste capítulo é apresentado o enquadramento da investigação e os objetivos do trabalho, assim como o estado da arte da análise estatística de dados meteorológicos e de radiação solar para a simulação de sistemas energéticos. É também apresentada a produção de energia elétrica atual na ilha da Madeira por tipo de fonte. É ainda descrita a estrutura da dissertação e a notação utilizada.

1.1. Enquadramento

O principal catalisador da aposta em fontes de energia renováveis foi o choque petrolífero de 1973. Desde então, ficou claro que existia uma dependência excessiva dos combustíveis fósseis. A mudança no estilo de vida e o constante aumento da população, associado ao elevado preço do petróleo e às suas implicações ecológicas, fizeram com que a procura de alternativas aos combustíveis fósseis aumentasse [1].

A mudança de paradigma levou à forte aposta nas energias renováveis, entre elas a energia solar. Sendo o Sol a estrela mais próxima do nosso planeta e a maior fonte de energia conhecida pelo Homem, faz todo o sentido tirar partido dela.

A elevada dependência de combustíveis de origem fóssil tem fortes impactos na economia de um país ou região, devido ao inconstante preço do petróleo [1]. Desta forma, é lógico que esses países ou regiões tirem o máximo partido dos seus recursos naturais.

A dissertação está enquadrada nas preocupações acima referidas abordando a determinação de um ano meteorológico típico com o intuito de simular e estimar a produção de energia elétrica por meio de um sistema solar fotovoltaico na ilha da Madeira, podendo assim diminuir o uso de combustíveis fósseis e as preocupações económicas e ambientais que deles advêm, atendendo também ao facto de a Ilha da Madeira ter uma rede elétrica autónoma, isolada.

1.2. Objetivos

O trabalho desenvolvido nesta dissertação está inserido no âmbito da análise de medições de diversas grandezas meteorológicas incluindo a radiação solar, da elaboração e validação de um modelo matemático que descreve o funcionamento de uma célula ou módulo fotovoltaico em função das condições ambientais, e da estimativa da produção de energia elétrica de origem fotovoltaica.

Os objetivos específicos desta dissertação são (i) contribuir para o estudo e identificação de padrões climatológicos através da determinação de anos meteorológicos típicos para

diferentes locais da ilha, (ii) elaboração de um modelo matemático simplificado de uma célula ou módulo fotovoltaico e a sua validação através de dados disponibilizados por fabricantes de módulos fotovoltaicos, e (iii) estimar a produção de energia elétrica de origem fotovoltaica em diferentes locais da ilha.

1.3. Motivação

A produção de energia elétrica na ilha da Madeira tem como origem fontes de energia fóssil (centrais térmicas) e fontes de energia renovável (hídrica, eólica, solar fotovoltaica, biomassa e R.S.U. – Resíduos Sólidos Urbanos). A distribuição da potência instalada na ilha da Madeira, no ano de 2014, em função da fonte é apresentada na Figura 1.1 [2].

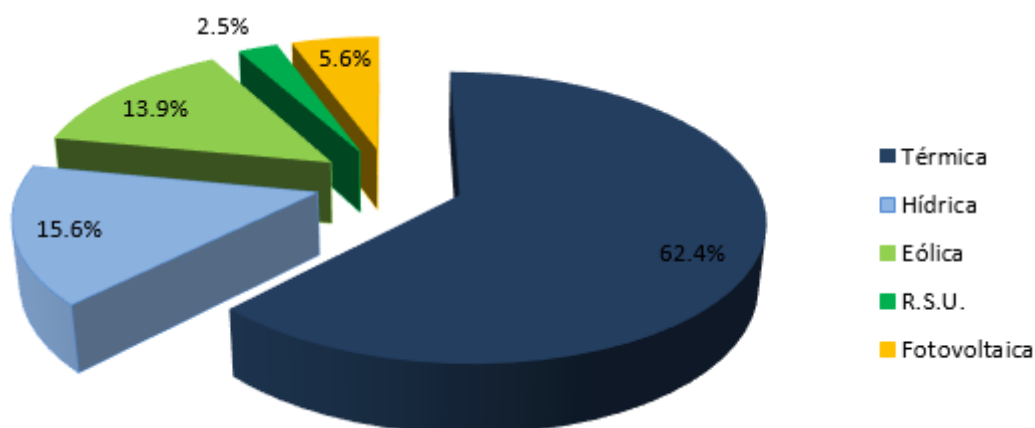


Figura 1.1 - Distribuição da potência instalada na ilha da Madeira em 2014 em função da fonte.

No que diz respeito ao sistema electroprodutor da ilha da Madeira, 70.3% da produção de energia elétrica tem origem em centrais que utilizam combustíveis de origem fóssil, sendo os restantes 29.7% produzidos por centrais que utilizam os recursos endógenos da região, nomeadamente hídrica, eólica e solar fotovoltaica. A distribuição da produção de energia elétrica na ilha da Madeira em 2014, é apresentada na Figura 1.2 [2].

Na Figura 1.2, as fontes de energia fóssil predominam no sistema electroprodutor. Esta elevada predominância faz com que o sistema electroprodutor seja caracterizado por uma forte dependência externa dos combustíveis de origem fóssil [3]. Assim, aumentar a eficiência do sistema electroprodutor nacional/regional no que respeita aos recursos endógenos, e aumentar a exploração dos recursos de origem renovável, é uma aposta de política energética que contribui para minorar a dependência externa dos combustíveis de origem fóssil [3].

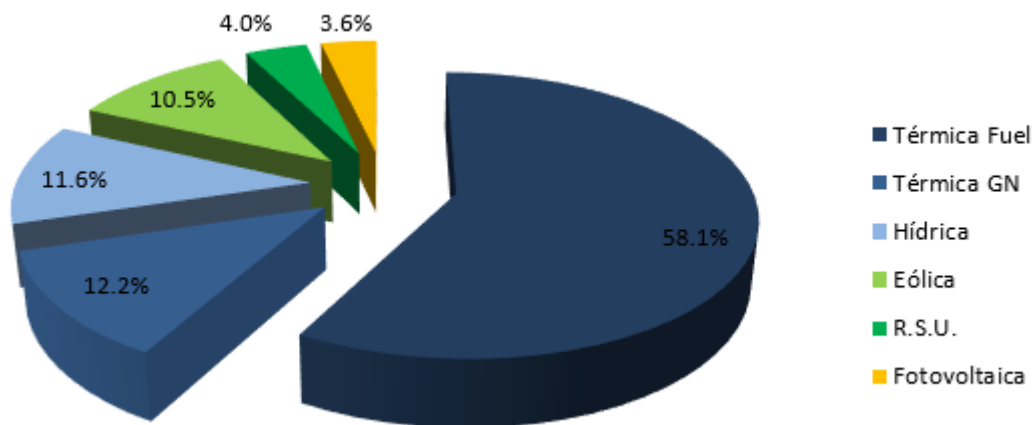


Figura 1.2 – Produção de energia elétrica na ilha da Madeira em 2014 [2].

A motivação para abordar o tema da avaliação do recurso solar e modelação de um sistema de energia fotovoltaica ligado à rede elétrica da ilha da Madeira surge neste âmbito, de forma a que este trabalho contribua para estimular o aumento da componente fotovoltaica no *mix* energético da região, diminuindo assim os custos associados à elevada dependência de combustíveis de origem fóssil.

1.4. Estado da Arte

Em [4], são apresentados dois tipos de sistemas fotovoltaicos: ligados à rede elétrica e isolados. Os sistemas fotovoltaicos ligados à rede elétrica são usualmente constituídos por módulos fotovoltaicos, inversor de corrente e um equipamento de medição. Os módulos fotovoltaicos convertem radiação solar em energia elétrica (corrente contínua), enquanto que o inversor permite que essa energia possa ser injetada na rede elétrica (corrente alternada) em condições adequadas de tensão, frequência e fase. A energia injetada na rede é medida no equipamento de medição. Existe também a possibilidade de adicionar a este sistema um conjunto de baterias, permitindo o armazenamento de energia para posterior consumo em horas em que não há produção (radiação solar indisponível), quer em sistemas isolados e autónomos quer ainda em sistemas de pequena dimensão ligados à rede. Os sistemas fotovoltaicos isolados são usualmente constituídos por módulos fotovoltaicos, regulador de tensão, banco de baterias e inversor. Estes sistemas são utilizados em áreas rurais onde não existe rede elétrica. O sistema está conectado ao banco de baterias através de um regulador de tensão. A função do inversor é a de adequar a frequência da corrente alternada.

Em [5], é esperado que a indústria fotovoltaica continue a crescer devido a diversos fatores como a diminuição do preço do silício e dos módulos fotovoltaicos, diminuição do custo de fabrico em larga escala, incentivos governamentais, maturação e proliferação de acordos de interconexão entre países e o contínuo melhoramento de tecnologias de conversão de energia. Os sistemas fotovoltaicos apresentam diversas

vantagens como o seu tempo de vida útil longo (25 anos a 30 anos), baixos custos de operação e manutenção e vantagens do ponto de vista ambiental quando comparados com centrais de combustíveis fósseis. Por outro lado, alguns autores [5] afirmam que a adoção em larga escala e a proliferação de sistemas fotovoltaicos ligados à rede podem provocar perturbações na rede elétrica devido à variabilidade do recurso solar.

Análise estatística de dados meteorológicos – Ano Meteorológico Típico

Em [6], para efetuar uma análise consistente de sistemas de energias renováveis, os softwares comerciais disponíveis necessitam de dados meteorológicos adequados. Estes dados meteorológicos são muitas vezes gerados através de métodos estatísticos que recorrem a bases de dados horárias. Em [7], os dois tipos de análise estatística de dados meteorológicos mais utilizados são o *Test Reference Year* (TRY) e o *Typical Meteorological Year* (TMY), referido nesta dissertação como Ano Meteorológico Típico (AMT).

Em [8], o AMT apresenta valores horários de radiação solar e de outras grandezas meteorológicas relevantes para o período de um ano. Uma das utilizações destes valores é a simulação computacional de sistemas de conversão de energia solar com o objetivo de facilitar comparações de performance entre diferentes tipos de sistemas, configurações e localizações. Por outro lado, uma vez que o AMT representa condições reais típicas ao invés de condições extremas, não é uma boa ferramenta para o dimensionamento de sistemas utilizando as condições mais desfavoráveis existentes num determinado local.

Em [9], o TRY é composto pela junção de doze meses das séries de medições meteorológicas reais. O uso do TRY na simulação computacional da performance de diferentes sistemas de energia solar reduz o esforço computacional da simulação e simplifica a análise dos resultados. Embora a norma ISO 15927-4:2005 descreva um método para a determinação de um ano de referência adequado à avaliação das necessidades anuais de aquecimento e arrefecimento de um edifício a longo prazo, foi demonstrado que também é adequado para a estimativa da energia elétrica gerada por um sistema fotovoltaico.

Em [10, 11, 12, 13], são apresentados vários TRY para diferentes locais em diferentes partes do globo, que são referidos aqui como exemplo do tipo de análise estatística que é feita com o objetivo de ser utilizada na estimativa da produção de sistemas de energia solar.

Em [7], são apresentados vários métodos para calcular o AMT: o método de Sandia [8], o método Dinamarquês [14], o método de Festa-Ratto [15], o método de Crow [16], o método de Miquel-Bilbao [17], o método de Gazela-Mathioulakis [18] e uma

aproximação estocástica (modelo de cadeia multivariada de primeira ordem de Markov) [6] e [19]. Alguns autores, como Skeiker [20], Janjai [21] e Ebrahimpour [22], compararam vários métodos e concluíram que o método de Sandia [8] é o que apresenta uma avaliação mais próxima à série de dados de longo prazo.

Em [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29], os autores utilizaram o método de Sandia [8] para gerar AMT para diferentes locais em diferentes partes do globo, recorrendo à estatística de Finkelstein-Schafer (FS) [30] para determinar os pares mês/ano candidatos a pertencer ao AMT.

Em [23], os autores indicam que a análise dos critérios de persistência é de difícil execução uma vez que é necessário ter em conta um elevado número de parâmetros estatísticos simultaneamente, e por essa razão, optaram por calcular a *Root Mean Square Difference* (RMSD) ao invés de verificarem os critérios de persistência referidos em [8] e [31], utilizando esta diferença para definir quais os melhores anos para pertencer ao AMT de entre os anos candidatos. Em [24, 25, 28], os autores também optaram por utilizar a RMSD como fator de exclusão dos anos candidatos.

Em [32, 33, 34], os autores construíram um *Typical Solar Radiation Year* (TSRY). O TSRY consiste na determinação de um ano meteorológico típico tendo em conta apenas a radiação solar, produzindo assim uma ferramenta útil aos projetistas de sistemas de energia solar.

Modelação de células fotovoltaicas

Em [35], a célula fotovoltaica é descrita como a parte mais pequena de um sistema fotovoltaico, constituída por um material semiconductor (normalmente silício), à qual são adicionadas substâncias *dopantes* de modo a que existam condições para que possa ocorrer efeito fotovoltaico, transformando radiação eletromagnética em energia elétrica. Usualmente, as células fotovoltaicas têm uma potência da ordem das unidades. Para obter maior potência, as células fotovoltaicas são ligadas em série e/ou paralelo sendo assim criados módulos fotovoltaicos com potências compreendidas entre valores da ordem das dezenas ou das centenas.

Em [36], é apresentada uma comparação entre diversos modelos propostos para extrair os parâmetros que caracterizam o comportamento de uma célula fotovoltaica. Os modelos analisados foram divididos consoante o número de parâmetros, de um até cinco parâmetros. Os modelos de [37], de [38], de [39], de [40] e de [41] representam o número de parâmetros em um, dois, três, quatro e cinco, respetivamente.

Em [42, 43, 44], são apresentados modelos matemáticos para caracterizar o comportamento de uma célula/módulo fotovoltaico de acordo com a radiação incidente e temperatura ambiente, sendo também apresentada a alteração da curva I-V de acordo

com condições ambientais variáveis. Em [45] e em [46] são apresentados modelos matemáticos que caracterizam o comportamento de uma célula/módulo fotovoltaico, sendo que os resultados obtidos são comparados com medições reais.

Em [47], é apresentada uma análise a vários modelos para determinar a temperatura de uma célula fotovoltaica. É demonstrado que os modelos que têm em conta a intensidade do vento apresentam melhores resultados, tendo sido analisados os modelos apresentados em [35], em [48], em [49], em [50] e em [51]. O modelo com melhores resultados para módulos de silício cristalino é o modelo apresentado em [50].

Em [52], são apresentados diversos parâmetros como o fator de produção ou número de horas equivalentes à potência de pico (Y_F) ou o *Performance Ratio* (PR) que indicam o desempenho de sistemas de energia fotovoltaica ligados à rede elétrica.

Potência instalada e produção de sistemas de energia fotovoltaica

Em [53], a capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos a nível mundial no ano de 2014 rondava os 177 GW. Com esta capacidade instalada, é possível produzir 210 TWh de energia elétrica de origem fotovoltaica, o que corresponde a pouco mais de 1% da demanda mundial de energia elétrica satisfeita através de energia elétrica de origem fotovoltaica. No que diz respeito à percentagem de energia elétrica de origem fotovoltaica injetada na rede, a Itália surge numa posição de destaque com um valor de 8% da demanda de energia na rede preenchida por energia elétrica de origem fotovoltaica. Portugal satisfaz 1.1% da sua demanda energética no ano de 2014 através de energia elétrica de origem fotovoltaica.

Em [54], a produção de energia elétrica de origem renovável em Portugal é definida em 49.2% relativamente à soma da produção bruta com o saldo importador, durante o período entre dezembro de 2014 e novembro de 2015. Até novembro de 2015 foram produzidos 786 GWh de origem fotovoltaica, o que representa um aumento de cerca de 25% relativamente ao ano de 2014.

Em [2], a percentagem de energia de origem renovável emitida para a rede elétrica da ilha da Madeira no ano de 2014 é de 29.7%. A percentagem de energia elétrica de origem fotovoltaica emitida para a rede elétrica da ilha da Madeira no ano de 2014 é de 3.6%.

Estudo da radiação solar na ilha da Madeira

Em [55], é apresentado um estudo sobre a distribuição da radiação solar global no arquipélago da Madeira. São apresentados mapas de radiação solar total média diária anual e mapas de radiação solar total média diária mensal. Estes mapas foram

desenvolvidos com recurso a medições de cinco estações meteorológicas localizadas na ilha da Madeira e Porto Santo, para o período de 2002 a 2005, e com recurso a imagens de satélite.

1.5. Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividida em cinco capítulos incluindo a introdução. Segue-se uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo.

No capítulo 2 é apresentado o tratamento estatístico efetuado às medições das diversas grandezas meteorológicas, gentilmente cedidas pelo IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera, incluindo filtragem, preenchimento de lacunas, estimativa da radiação difusa e determinação do ano meteorológico médio e do Ano Meteorológico Típico (AMT).

No capítulo 3 é apresentado o modelo construído em linguagem Matlab para simular o funcionamento de uma célula/módulo fotovoltaico através dos dados fornecidos pelo fabricante e da radiação solar incidente, da temperatura do ar ambiente e da intensidade do vento. É também feita uma estimativa da produção de energia de sistemas fotovoltaicos para os locais onde se localizam as estações meteorológicas analisadas.

No capítulo 4 é apresentada uma estimativa para toda a ilha da radiação solar global total anual incidente numa superfície horizontal e da energia produzida através de um sistema fotovoltaico. É também feita uma validação desta estimativa recorrendo a dados reais da produção de energia de três centrais fotovoltaicas instaladas na ilha.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho bem como linhas orientadoras para trabalhos futuros.

1.6. Notação

O texto desta dissertação segue o novo acordo ortográfico e o estilo de citação utilizado é o da Norma IEEE 2006, isto é, as equações são apresentadas entre parênteses curvos () e as referências bibliográficas são apresentadas entre parênteses retos [], numeradas sequencialmente. As figuras e as tabelas são numeradas sequencialmente. As expressões em língua estrangeira são apresentadas em itálico. Os símbolos e acrónimos utilizados neste trabalho estão apresentados na lista de símbolos e na lista de acrónimos. As tabelas e as legendas das figuras têm todas o mesmo tamanho de fonte alfanumérica.

Capítulo 2 - Determinação do Ano Médio e do Ano Meteorológico Típico

Neste capítulo é apresentado o tratamento de dados efetuado com as medições das diversas grandezas meteorológicas. É destacada a filtragem de acordo com os limites físicos expectáveis para cada grandeza, o preenchimento de lacunas através de interpolações e correlações entre as várias estações meteorológicas, a correção da radiação difusa devido à banda de sombreamento do aparelho de medida (piranómetro), a estimativa da radiação difusa para as estações que não tinham essa medição e a determinação do ano médio e do ano meteorológico típico (AMT).

2.1. Filtragem, Validação e Correção dos Dados

2.1.1. Dimensão da amostra de dados utilizada

O Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) forneceu medições de dezassete estações meteorológicas. Na realização deste trabalho apenas foram tratados os dados relativos a oito estações. As razões para tratar apenas dados de oito estações foram o curto período de tempo de funcionamento de algumas dessas estações ou a ausência de sensores que medissem algumas das grandezas meteorológicas necessárias à determinação do ano meteorológico típico, nomeadamente a radiação solar global. As estações meteorológicas analisadas, a sua respetiva localização e amostra de dados são apresentadas na Tabela 2.1. A distribuição espacial das estações meteorológicas analisadas na ilha da Madeira é apresentada na Figura 2.1.

Tabela 2.1 – Estações meteorológicas analisadas, respetiva localização e amostra de dados.

Estação	Latitude (N)	Longitude (W)	Altitude [m]	Período [anos]
Areeiro	32° 43' 20''	16° 54' 55''	1610	12
Canical	32° 44' 54''	16° 42' 24''	68	5
Lido	32° 38' 12''	16° 56' 08''	13	12
Observatório	32° 38' 51''	16° 53' 33''	58	11
Lombo da Terça	32° 49' 52''	17° 12' 08''	660	5
Lugar de Baixo	32° 40' 52''	17° 05' 24''	15	12
Ponta do Pargo	32° 48' 48''	17° 15' 42''	312	7
São Jorge	32° 50' 04''	16° 54' 42''	82	12



Figura 2.1 - Distribuição espacial das estações meteorológicas na ilha da Madeira.

Este trabalho consistiu na análise de medições de cinco estações na encosta sul da ilha: Caniçal, Lido, Observatório, Lugar de Baixo e Ponta do Pargo; uma estação na parte interior da ilha, na zona mais montanhosa: Areiro; e duas estações na encosta norte: Lombo da Terça e São Jorge.

2.1.2. Filtragem da radiação solar global e correção da radiação difusa

Foram aplicadas às séries de dados da radiação solar global e radiação difusa (quando disponível) os filtros de qualidade dos dados utilizados na estação de Cabauw, na Holanda [56], de acordo com as normas das estações BSRN – *Baseline Surface Radiation Network* [57]. Estes filtros permitem identificar valores fisicamente impossíveis, valores extremamente raros e ainda valores que, através da razão entre a radiação difusa e a radiação solar global, não sejam consistentes. Os filtros de qualidade utilizados na estação de Cabauw [56] são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Filtros de qualidade utilizados na estação de Cabauw.

Filtro	Valor mínimo	Valor máximo	Restrição
Radiação global: Limites fisicamente possíveis	- 4 W/m ²	$S_a \times 1.5 \times \mu_0^{1.2} + 100$ W/m ²	-
Radiação global: Limites extremamente raros	- 2 W/m ²	$S_a \times 1.2 \times \mu_0^{1.2} + 50$ W/m ²	-
Razão entre radiação difusa e radiação global	-	1.05	$\Phi < 75^\circ$ e Global > 50 W/m ²
	-	1.10	$75^\circ < \Phi < 93^\circ$ e Global > 50 W/m ²

A radiação no topo da atmosfera, S_a , é determinada em função do dia do ano através de

$$S_a = S_0 t \quad (1)$$

em que

$$t = 1.00011 + 0.034221 \cos(\chi) + 0.00128 \sin(\chi) + 0.000719 \cos(2\chi) + 0.000077 \sin(2\chi) \quad (2)$$

com

$$\chi = \frac{2\pi(i-1)}{365} \quad (3)$$

e

$$\mu_0 = \cos(\Phi) \quad (4)$$

sendo S_0 a constante solar ($S_0 = 1366 \text{ W/m}^2$), Φ o ângulo de zênite, i o dia juliano. O ângulo de zênite é dado em [58] por:

$$\cos(\Phi) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (5)$$

em que a declinação, δ , em [58] é dada por:

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(284 + i)\right] \quad (6)$$

e o ângulo horário, ω , em [59] é dado por:

$$\omega = (h_a - 12)15 \quad (7)$$

A hora solar aparente, h_a , é obtida em função da hora UTC de registo dos dados e longitude do local [58], da seguinte forma:

$$h_a = UTC + \frac{ET}{60} + \frac{SL - LL}{15} \quad (8)$$

em que LL e SL são, respetivamente, a longitude local e a longitude do meridiano de referência ($SL = 0^\circ$) e em que a Equação do Tempo, ET , em minutos, em [59] é dada por:

$$ET = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad (9)$$

com

$$B = (i - 81) \frac{360}{364} \quad (10)$$

Os valores medidos pelos sensores de radiação que não cumpriram os critérios dos filtros foram classificados como falhas.

A radiação difusa é medida apenas na estação do Observatório através de um piranômetro com uma banda de sombreamento. A banda tem a função de bloquear a radiação solar direta. No entanto, dada a sua construção e dimensão, a banda de sombreamento bloqueia também parte da radiação difusa que se pretende medir. Assim, foi aplicada uma correção que teve como objetivo determinar a radiação difusa que foi bloqueada. O método usado para efetuar essa correção é descrito em [58]. A fração de radiação difusa bloqueada para condições isotrópicas é dada por:

$$X = \frac{2b}{\pi r} \cos^3(\delta) \left[\left(\frac{\pi}{180} \psi_s \right) \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \sin(\psi_s) \right] \quad (11)$$

sendo b a largura da banda, r o raio de curvatura da banda em centímetros, ψ_s o azimute de nascer do sol, L a latitude do lugar e δ a declinação solar, em graus. O ângulo de azimute de nascer do sol, em [58], é dado por:

$$\psi_s = -\cos^{-1}(\sin(\delta) / \cos(L)) \quad (12)$$

O modelo de banda de sombreamento é o da Eppley ($b = 7.6$ cm e $r = 31.7$ cm) [58].

A correção K' a ser aplicada é dada por:

$$K' = \frac{1}{1 - X} \quad (13)$$

Em condições não isotrópicas de radiação difusa, o fator total K_d a ser aplicado aos dados medidos varia de acordo com a presença ou ausência de nuvens. As expressões que determinam o valor de K_d de acordo com essa ocorrência de nuvens são apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Valor de K_d de acordo com a ocorrência de nuvens.

Condição do céu	K_d
Céu limpo	$K' + 0.07$
Céu nublado	$K' + 0.03$
Céu parcialmente nublado	$K' + 0.04$

A expressão utilizada na correção da radiação difusa foi a expressão para céu parcialmente nublado, recomendada pelo fabricante em [58], sendo necessária uma análise dos dados mais aprofundada de maneira a determinar a parcela que soma a K' em função de outras medições que não estavam disponíveis, nomeadamente a medição

da cobertura de nuvens. O fator K_d foi multiplicado pelos dados medidos pelo piranómetro, sendo assim obtida a radiação difusa corrigida.

2.1.3. Filtragem dos dados de temperatura máxima e mínima

A filtragem dos valores de temperatura foi efetuada através da consulta da normal climatológica disponível para a ilha da Madeira, i.e., a normal climatológica do Funchal para o período 1971-2000 [60].

Uma vez que os limites definidos pela normal climatológica podem ser ultrapassados, a filtragem das medições de temperatura mínima e máxima foi efetuada considerando essa possibilidade. Assim, foi definido um intervalo de temperatura adequado para cada estação, determinado de forma heurística, de acordo com a sua proximidade à estação de referência: a estação do Observatório no Funchal. O filtro de temperatura e a percentagem total de falhas são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Filtro de temperatura e percentagem total de falhas.

Estações	Intervalo de temperatura ΔT [°C]	Percentagem total de falhas [%]
Areeiro	15	4.58
Canical	8	1.64
Lido	5	7.96
Observatório	3	0.71
Lombo da Terça	8	10.76
Lugar de Baixo	8	1.06
Ponta do Pargo	10	0.27
São Jorge	10	1.51

As medições que se situavam fora dos intervalos de variação em relação aos valores extremos da normal climatológica 1971-2000 indicados na Tabela 2.4 foram classificadas como falhas. Foi verificada que uma pequena percentagem de valores não passaram pelo filtro, sendo que a percentagem total de falhas apresentada na Tabela 2.4 inclui quer os dados descartados pelo filtro quer as falhas existentes nas séries de dados originais.

2.1.4. Humidade relativa do ar e Intensidade média do vento

No que diz respeito à humidade relativa do ar e à intensidade média do vento não foram aplicados filtros aos valores medidos pelos sensores, tendo apenas sido verificado que a humidade estava entre 0 e 100% e que a intensidade do vento não apresentava valores negativos, o que indicaria que se tratavam de falhas.

2.2. Preenchimento de Lacunas nas Séries de Dados

2.2.1. Radiação solar global

O preenchimento de lacunas da radiação solar global foi realizado através de interpolações lineares e de correlações com estações próximas. A interpolação linear foi utilizada quando as lacunas eram de uma ou de duas horas consecutivas, seguindo o que está previsto no procedimento de determinação do AMT que foi adotado neste trabalho [8]. Nos casos em que as lacunas nas séries de dados eram superiores a duas horas, foram utilizadas correlações com outras estações, com prioridade para as estações mais próximas. As correlações para a radiação solar global foram construídas utilizando os valores totais diários e descartando os dias onde existissem lacunas, o que resulta numa correlação baseada apenas em medições realísticas da irradiação total diária nas diversas estações. A correlação para a radiação solar global entre a estação do Observatório e a estação do Lido é apresentada na Figura 2.2. A correlação para a radiação solar global entre a estação do Lido e do Lugar de Baixo é apresentada na Figura 2.3.

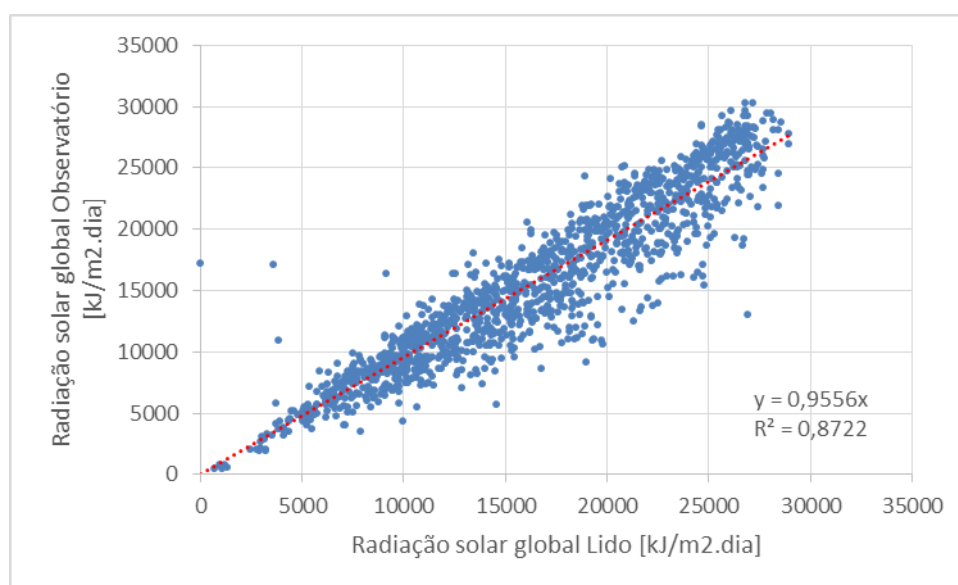


Figura 2.2 – Correlação da radiação solar global (valores totais diários) entre a estação do Observatório e a estação do Lido.

A Figura 2.2 e a Figura 2.3 mostram que as correlações entre estações são um método viável para o preenchimento das lacunas existentes nas séries de dados uma vez que os coeficientes de determinação são superiores a 0.8, o qual se estipulou ser o valor mínimo admissível para considerar as correlações como representativas da realidade.

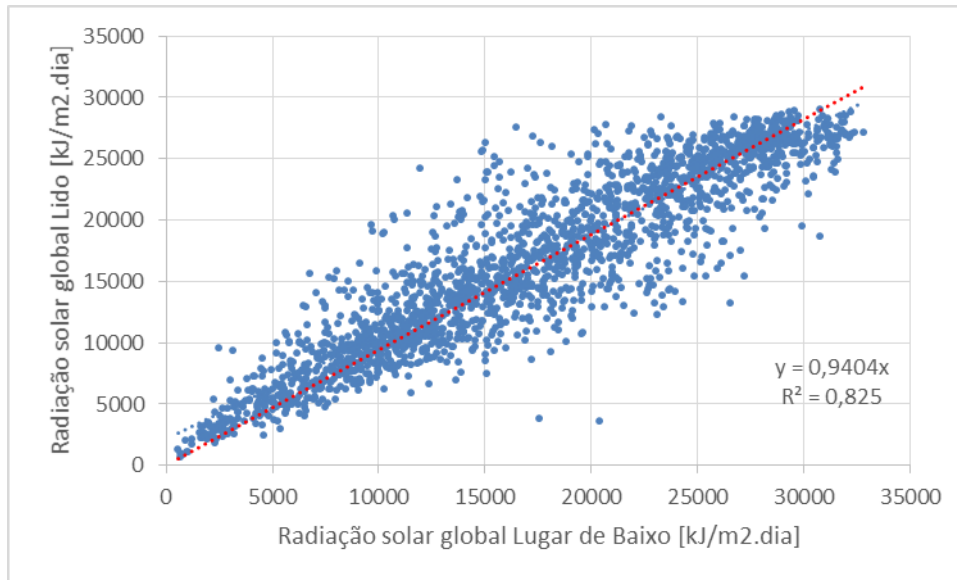


Figura 2.3 – Correlação da radiação solar global (valores totais diários) entre a estação do Lido e a estação do Lugar de Baixo.

No preenchimento de lacunas de radiação solar global nas estações do Observatório, Lido e Lugar de Baixo surgiram quatro dias onde existiam falhas superiores a duas horas mas não existiam medições reais em nenhuma destas três estações que pudessem preencher essas lacunas através das correlações geradas. Para contornar este problema, foi realizada uma interpolação diária para essas horas entre o dia anterior e o dia seguinte. Este método foi igualmente adotado noutros trabalhos, nomeadamente na geração de anos típicos para o estudo do comportamento térmico de edifícios [61]. Na Figura 2.4 é apresentada a interpolação diária efetuada para as 15, 16 e 17 horas do dia 06/12/2006 na estação do Observatório.

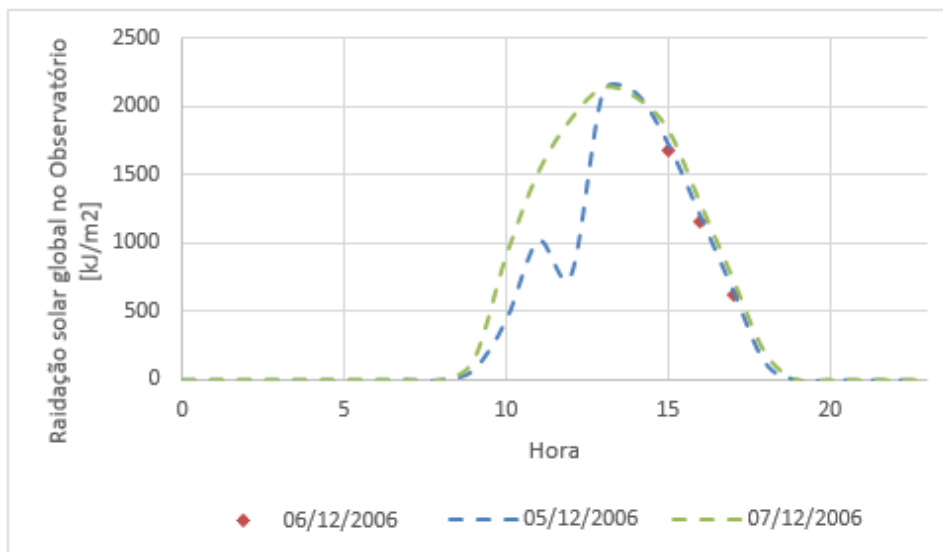


Figura 2.4 – Interpolação diária para o dia 06/12/2006 na estação do Observatório.

2.2.2. Radiação difusa

O preenchimento das lacunas existentes nas medições da radiação difusa foi realizado mediante interpolações lineares no caso das lacunas serem de uma ou duas horas consecutivas, ou com recurso à correlação de Liu e Jordan [58] no caso de as lacunas serem superiores a duas horas consecutivas. Esta correlação permite obter estimativas de radiação difusa horária, I_d , em função da radiação difusa diária média mensal, H_d , do ângulo horário, ω , e do ângulo horário do pôr-do-sol, ω_s , sendo dada por:

$$\frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_s)}{\sin(\omega_s) - \omega_s \left(\frac{\pi}{180}\right) \cos(\omega_s)} \quad (14)$$

sendo H_d obtido através de outra correlação apresentada em [58], dada por:

$$\frac{H_d}{H} = 1.390 - 4.027K_T + 5.531K_T^2 - 3.108K_T^3 \quad (15)$$

em que o índice de claridade, K_T , é dado por:

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (16)$$

sendo H a radiação global média diária mensal no local (medições) e H_0 a radiação global média diária mensal no topo da atmosfera, dada por:

$$H_0 = \frac{24 * 3600S_0}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360i}{365}\right) \right] \left[\cos(L) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \left(\frac{\pi\omega_s}{180}\right) \sin(L) \sin(\delta) \right] \quad (17)$$

O ângulo horário, ω , é obtido em função da hora UTC dos registos usando (7) e o ângulo de horário do pôr-do-sol, ω_s , é dado por:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan(L) \tan(\delta)) \quad (18)$$

Todos os valores horários de radiação difusa gerados desta maneira foram comparados com os respetivos valores horários de radiação solar global, tendo sido garantido que a radiação difusa era sempre inferior ou igual à radiação solar global.

No âmbito deste trabalho, o conhecimento da radiação difusa juntamente com a radiação solar global é importante porque permite uma melhor estimativa da produção de energia por via fotovoltaica. Dado que a única estação que possui medições de

radiação difusa é a estação do Observatório, a correlação de Liu e Jordan foi utilizada para estimar a radiação difusa nas restantes estações. Na Secção 4.3 será apresentada uma avaliação do impacto desta aproximação da radiação difusa na estimativa da produção de energia, comparando os resultados obtidos para a estação do Observatório usando os valores de radiação medidos e os valores calculados pelas correlações.

2.2.3. Temperatura, Humidade Relativa e Intensidade do Vento

O preenchimento das lacunas existentes nas medições da temperatura e humidade relativa do ar médias, máximas e mínimas e da intensidade média do vento foi realizado com recurso a interpolação linear quando as lacunas eram de uma ou duas horas consecutivas e correlações com as estações próximas nos casos em que as lacunas eram superiores a duas horas, favorecendo sempre as estações que se encontravam mais próximas da estação em que o preenchimento estava a ser efetuado. As correlações para os valores horários de temperatura média do ar, humidade relativa média do ar e intensidade média do vento entre as estações do Observatório e do Lido são apresentadas na Figura 2.5, na Figura 2.6 e na Figura 2.7, respetivamente.

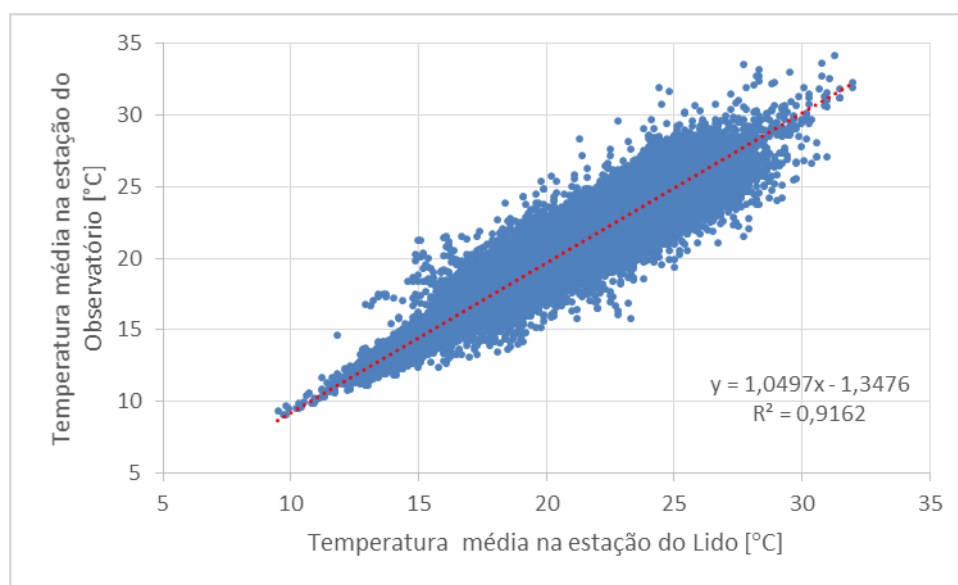


Figura 2.5 – Correlação da temperatura média do ar entre a estação do Observatório e a estação do Lido.

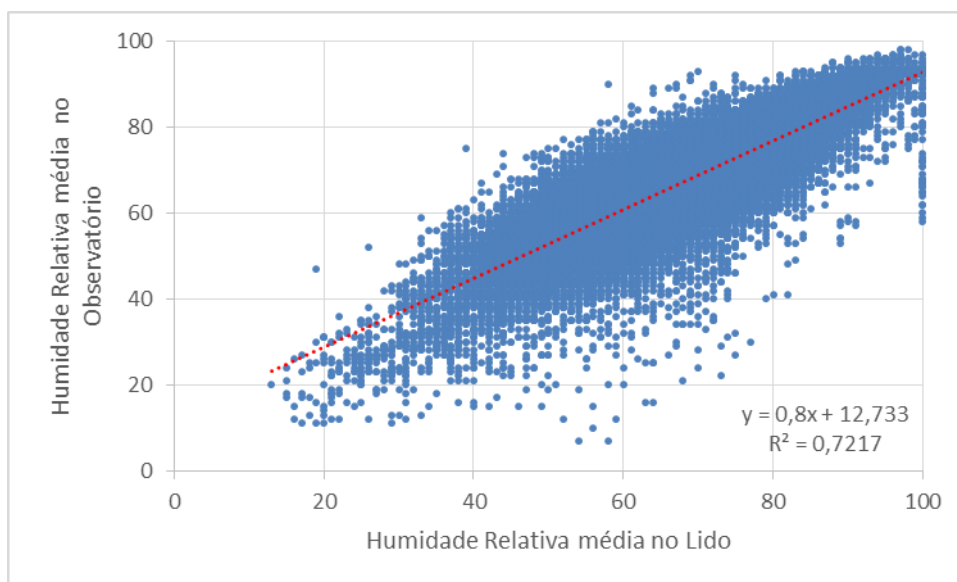


Figura 2.6 – Correlação da humidade relativa média do ar entre a estação do Observatório e a estação do Lido.

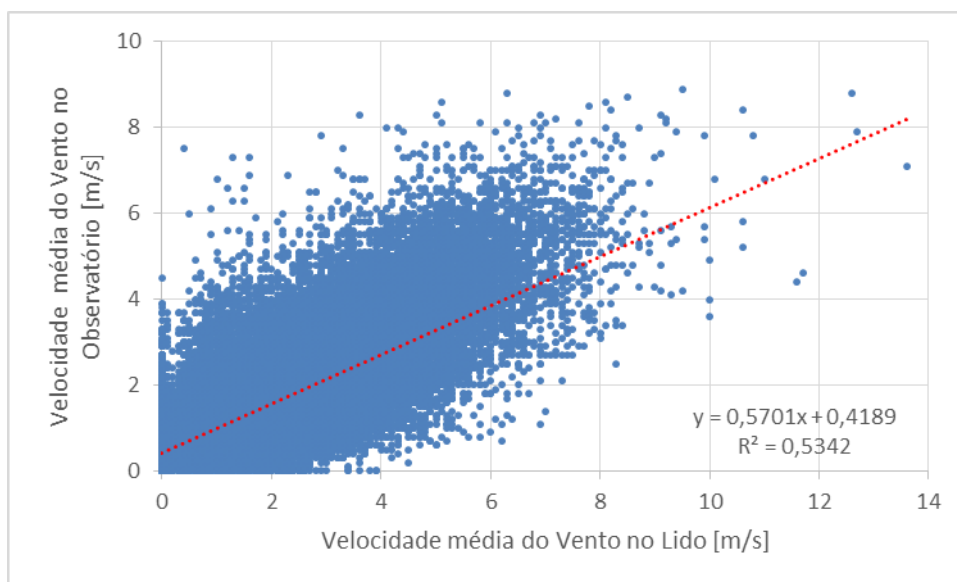


Figura 2.7 – Correlação da intensidade média do vento entre a estação do Observatório e a estação do Lido.

Na Figura 2.5 a regressão linear entre as estações do Observatório e o Lido, para a temperatura média do ar, é um método viável para o preenchimento das lacunas existentes nas séries de dados, possuindo um coeficiente de determinação superior a 0.9. Na Figura 2.6 há uma redução no coeficiente de determinação em relação às regressões lineares obtidas para a radiação solar global ou para a temperatura média do ar. Na Figura 2.7 as regressões lineares para a intensidade média do vento são as que apresentam menores coeficientes de determinação. Esta redução no coeficiente de determinação ocorre devido à maior variabilidade temporal e espacial da intensidade do vento.

A única estação em que esta metodologia não foi aplicável foi para a intensidade média do vento na estação do Caniçal, não tendo sido possível estabelecer uma boa correlação com outra estação, possivelmente devido à sua localização geográfica particular. A forma de contornar este problema e preencher as lacunas nas séries de dados da estação do Caniçal, foi admitir que quando existe uma lacuna de dados nessa estação, a intensidade média do vento para essa hora é igual à intensidade do vento na estação de São Jorge, que é a estação mais próxima, o que corresponde a uma correlação $y=x$.

A percentagem de dados gerados por interpolação ou através das correlações em cada estação, para cada grandeza meteorológica, em relação à amostra total de dados dessa estação é apresentada na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Percentagem de dados gerados em cada estação em relação à amostra total de dados.

Estação	Temperatura	Radiação Solar Global	Radiação Difusa	Intensidade do Vento	Humidade Relativa
Areeiro	4.6	14.3	100	4.4	4.7
Caniçal	1.6	3.7	100	1.6	1.6
Lido	7.3	8.4	100	9.4	10.8
Observatório	0.7	23.1	23.1	3.9	0.7
Lombo da Terça	10.8	12.1	100	12.6	6.5
Lugar de Baixo	1.1	9.6	100	1.1	1.1
Ponta do Pargo	0.3	4.8	100	0.3	4.6
São Jorge	1.5	10.3	100	1.5	2.2

Na Tabela 2.5 a grandeza meteorológica com número de lacunas mais elevado é a radiação solar global e a grandeza meteorológica com as séries de dados mais completas é a temperatura média do ar sendo, em todo o caso, relativamente baixas e inferiores a 15%, exceto no caso da radiação solar global na estação do Observatório já referida.

2.2.4. Cálculo de médias e extremos

Dado que a maioria das estações não apresenta valores de temperatura média horária, esta foi calculada através da média das temperaturas mínima e máxima para cada hora. Embora este valor possa não corresponder verdadeiramente à temperatura média horária real, os desvios não serão significativos por se tratar dum período de uma hora tendo sido esta a metodologia encontrada para solucionar este problema. Quanto à intensidade do vento, foi considerado que a intensidade máxima num determinado dia correspondia à intensidade média máxima horária desse dia, não se considerando assim o valor da rajada máxima de vento.

2.3. Determinação do Ano Médio

2.3.1. Metodologia

Um ano médio consiste na média horária de todos os pares dia juliano/hora existentes na amostra de dados, independentemente do ano a que pertencem. Foram excluídos todos os dados considerados como falhas.

Foi construída uma matriz dia x hora cujos elementos A_{ij} são valores médios, com $i = 1, \dots, 365$ e $j = 1, \dots, 24$. Além disso, foi aplicada uma média centrada móvel de cinco dias de modo a captar os padrões climatológicos de variação de cada uma das grandezas meteorológicas estudadas, permitindo assim condensar informação de um longo período de tempo. Esta média é calculada através dos valores da hora j dos dias $i-2, i-1, i, i+1$ e $i+2$.

A principal desvantagem associada a um ano médio é a “suavização” de fenómenos meteorológicos de curta duração. Estes fenómenos são importantes na simulação de sistemas de energias renováveis, porque é possível verificar a resposta destes sistemas quando sujeitos a essas situações. Assim, um ano médio é indicado para representar parâmetros climatológicos de longa duração, em detrimento de fenómenos meteorológicos de curta duração.

2.3.2. Resultados

Com o intuito de melhor identificar os padrões climatológicos presentes no ano médio, foi feita uma representação da matriz A_{ij} para todas as estações e grandezas meteorológicas. Nesta secção são apresentadas as representações gráficas da radiação para uma estação da encosta sul (Observatório), uma estação da encosta norte (São Jorge) e uma estação localizada no centro montanhoso da ilha (Areeiro). O ano médio de radiação solar global e de radiação difusa, na estação do Observatório, é apresentado na Figura 2.8 e na Figura 2.9, respetivamente. O ano médio de radiação solar global na estação de São Jorge é apresentado na Figura 2.10. O ano médio de radiação solar global na estação do Areeiro é apresentado na Figura 2.11.

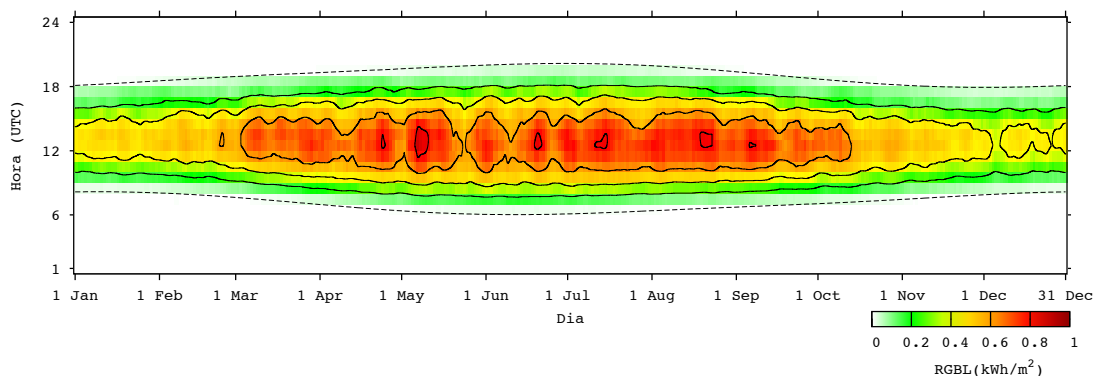


Figura 2.8 – Ano médio de radiação solar global na estação do Observatório.

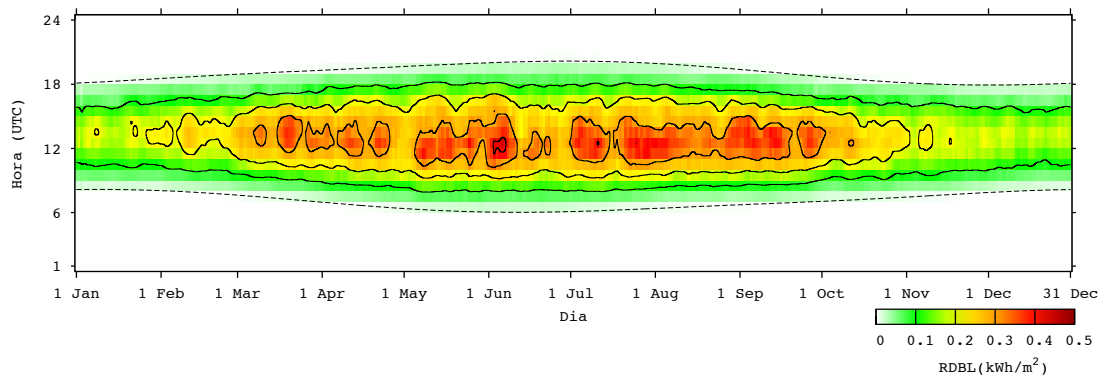


Figura 2.9 – Ano médio de radiação difusa na estação do Observatório.

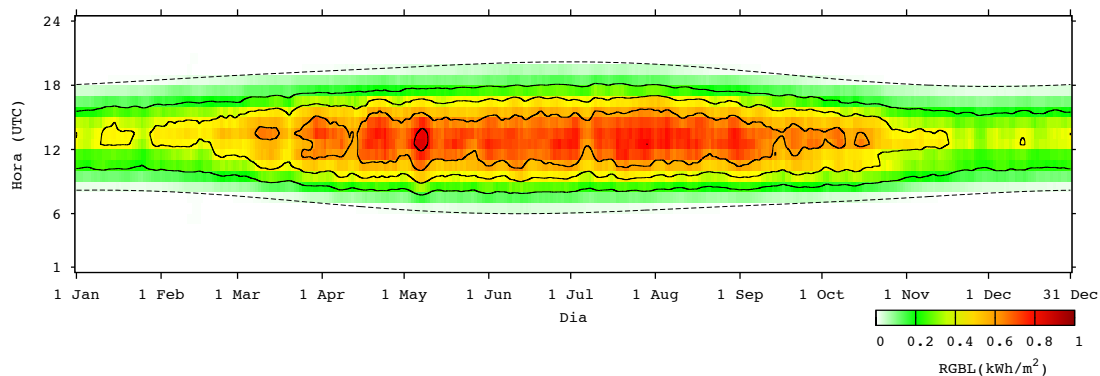


Figura 2.10 - Ano médio de radiação solar global na estação de São Jorge.

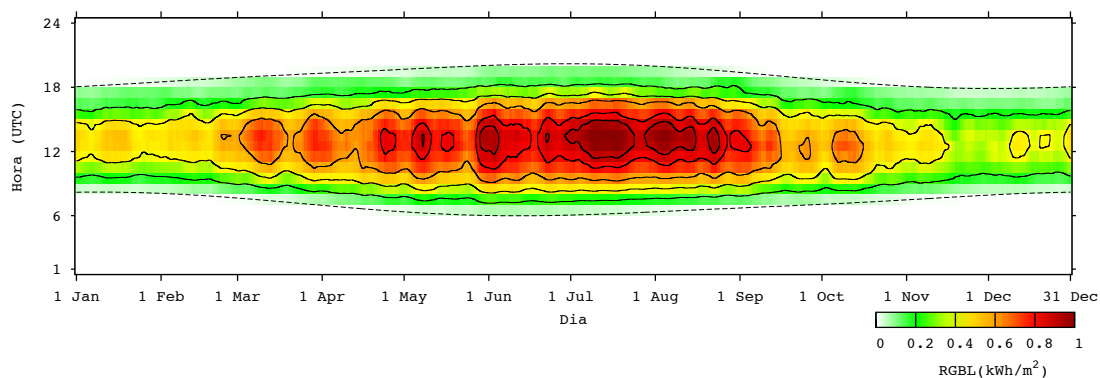


Figura 2.11 - Ano médio de radiação solar global na estação do Areeiro.

Na Figura 2.8, na Figura 2.10 e na Figura 2.11 a estação que apresenta maior valor de radiação solar global média é a estação do Areeiro. Isto ocorre em parte devido ao facto de a estação meteorológica do Areeiro estar instalada a uma altitude considerável, o que faz com que a radiação sofra menor atenuação e dispersão na atmosfera sendo, no entanto, necessários estudos mais aprofundados em termos da meteorologia local para explicar este facto, o qual foi também reportado noutros estudos [55]. O ano médio de radiação solar global, temperatura média do ar e intensidade média do vento para as restantes estações analisadas encontra-se no Anexo I.

2.4. Determinação do Ano Meteorológico Típico (AMT)

2.4.1. Metodologia e respetiva aplicação

O AMT para as diferentes estações foi determinado através da elaboração de um algoritmo em Matlab seguindo o método de Sandia [8, 31]. O modelo tem como valores de entrada as medições sem lacunas de temperatura média, máxima e mínima do ar, humidade relativa média, máxima e mínima do ar, intensidade média e máxima do vento e radiação solar global. Este método analisa as nove grandezas meteorológicas e selecciona, para cada mês do calendário, o par mês/ano que mais se ajusta à média de toda a amostra de dados para esse mês (Mês Meteorológico Típico – MMT). Este processo é repetido até se obterem todos os meses do ano, formando assim um ano meteorológico típico. Como meses consecutivos do ano meteorológico típico podem pertencer a anos diferentes, é feita uma suavização de seis horas no final do mês anterior e início do mês seguinte através de uma interpolação polinomial. A sequência de procedimentos efetuados para a determinação do AMT é apresentada na Figura 2.12.

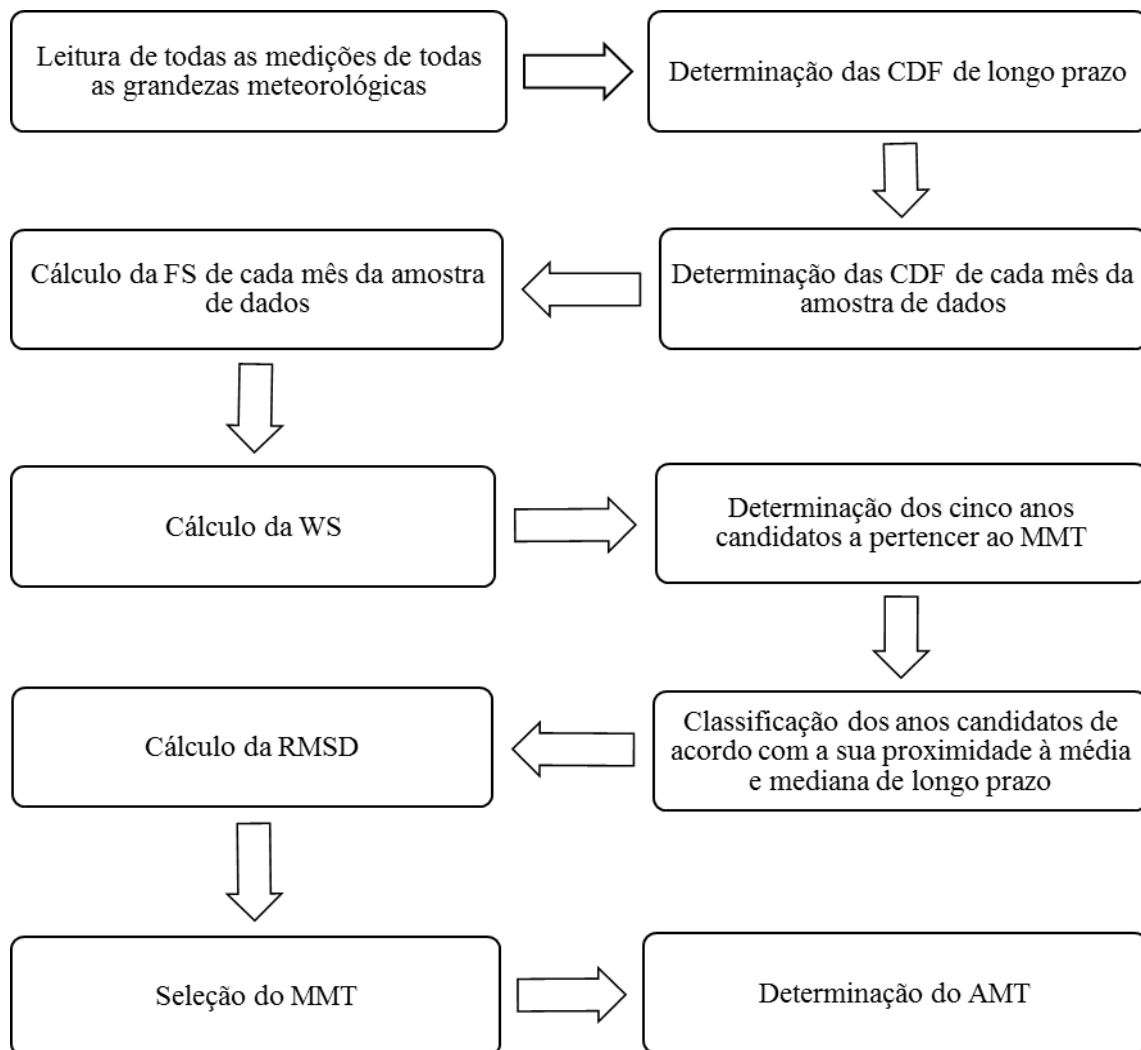


Figura 2.12 - Sequência de procedimentos para a determinação do AMT

O método de Sandia [8] pode ser dividido em duas partes. Na primeira parte, os cinco melhores anos para cada mês do calendário são selecionados, através da comparação das suas respectivas funções distributivas cumulativas (CDF) de valores diários, para todos os meses e parâmetros, com a CDF de longo prazo de todos os parâmetros (referente a toda a amostra de dados). Esta comparação é efetuada através do cálculo da estatística de Finkelstein-Schafer (*FS*) [30]. De acordo com este procedimento estatístico, se um número N de medições (valores diários) de uma determinada grandeza estão disponíveis e ordenados de forma crescente x_1, x_2, \dots, x_N , a CDF desta variável é dada por uma função $S_N(x)$ definida por:

$$S_N(x) = \begin{cases} 0, & x < x_{(1)} \\ \frac{c - 0.5}{N}, & x_{(c)} \leq x \leq x_{(c+1)} \\ 1, & x \geq x_{(c)} \end{cases} \quad (19)$$

sendo c o índice da medição e N o número de dias do mês no caso das CDF de cada par mês/ano ou o número total de registos diários no caso das CDF de longo prazo para cada mês de calendário.

A função $S_N(x)$ é uma função monótona crescente com um incremento de $1/N$ e é definida entre 0 e 1. A estatística *FS* para cada par mês/ano é dada por:

$$FS = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N D_k \quad (20)$$

sendo D_k o módulo da diferença entre a CDF de longo prazo e a CDF do mês candidato, e N o número de dias do mês.

Nem todas as grandezas meteorológicas têm o mesmo peso estatístico na escolha do AMT pelo que são atribuídos diferentes coeficientes de ponderação a cada uma das grandezas analisadas. O peso estatístico atribuído a cada grandeza na determinação do AMT é apresentado na Tabela 2.6. Foi efetuada uma soma ponderada (*WS*) que resulta da multiplicação do peso de cada parâmetro (w_p) pela respetiva *FS*. A expressão para o cálculo de *WS* é dada por:

$$WS = \sum_{p=1}^9 w_p * FS_p \quad (21)$$

Os cinco meses com o menor valor de *WS* são selecionados como meses candidatos a pertencerem ao AMT.

Tabela 2.6 – Pesos estatísticos para a determinação do AMT.

Grandeza Meteorológica	Temperatura do ar			Humidade relativa			Intensidade do vento		Radiação solar global
	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	
Peso estatístico (w)	2/24	1/24	1/24	2/24	1/24	1/24	2/24	2/24	12/24

Após a seleção dos cinco meses candidatos, estes são ordenados de acordo com a sua proximidade à média e mediana de longo prazo.

A segunda parte da determinação do AMT consiste em analisar critérios de persistência da temperatura média do ar e da radiação solar global para escolher o mês meteorológico típico (MMT). Neste trabalho não foram analisados critérios de persistência, tendo sido seguido o método apresentado em [23], em que o autor sugere um método alternativo mais simples: o cálculo da *Root Mean Square Difference (RMSD)* para a radiação solar global, dada por:

$$RMSD = \left(\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n d_m^2 \right)^{1/2} \quad (22)$$

sendo n o número de horas do dia em que a radiação solar global é maior que zero e d_m a diferença entre a radiação horária do mês e a radiação média horária de longo prazo para esse mesmo mês.

O ano com menor valor de *RMSD* e todos os outros anos cujos valores de *RMSD* estejam dentro do intervalo $\min\{RMSD\} + 0.02$ são selecionados. A *FS* da radiação solar global desses anos é analisada e o ano que tiver menor valor de *FS*, bem como todos os outros que estejam dentro do intervalo $\min\{FS\} + 0.03$, são selecionáveis. Se no passo anterior for selecionado mais do que um ano, a *FS* para a temperatura média do ar desses anos é analisada e o ano com menor valor de *FS* é selecionado, obtendo assim o MMT. Após a seleção de todos os MMT, o AMT é construído juntando os 12 meses selecionados e suavizando a transição entre meses através da média móvel centrada das várias grandezas nas seis horas iniciais e nas seis horas finais de cada mês.

A comparação entre as CDF de cada ano, para um determinado mês do calendário, permite observar o quão distante está um determinado ano em relação à CDF de longo prazo do mês em análise. A comparação entre as CDF para a radiação solar global, temperatura média do ar, humidade relativa média do ar e intensidade média do vento na estação do Observatório é apresentada na Figura 2.13, na Figura 2.14, na Figura 2.15 e na Figura 2.16, respetivamente. Na Figura 2.13, na Figura 2.14, na Figura 2.15 e na Figura 2.16 a CDF de longo prazo do mês em estudo é representada a negro, o ano com a CDF mais próxima à CDF de longo prazo é representado a verde, o ano com a CDF mais afastada da CDF de longo prazo é representado a vermelho, e o ano selecionado para o AMT é representado a azul.

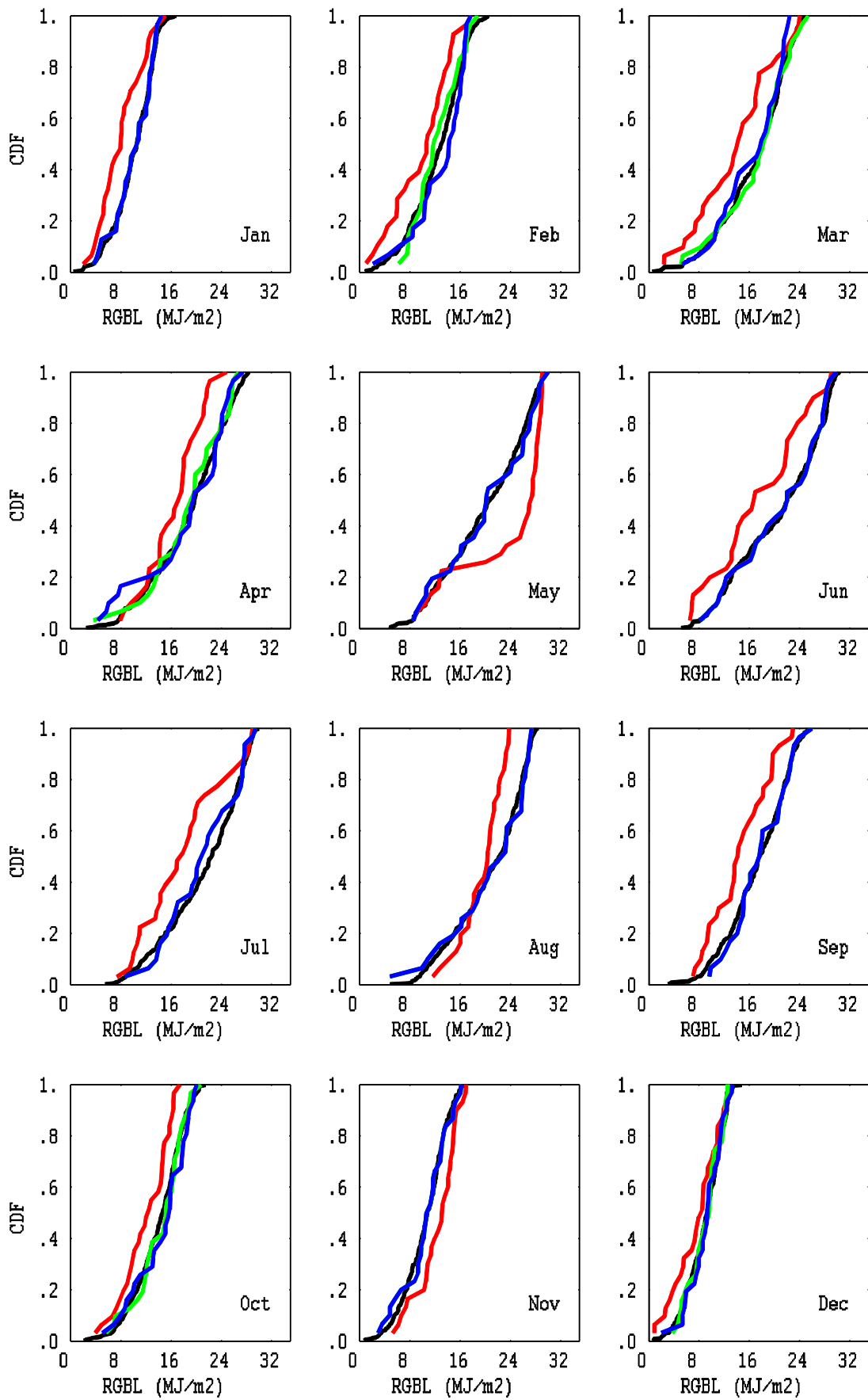


Figura 2.13 – Comparação entre as CDF para a radiação solar global na estação do Observatório.

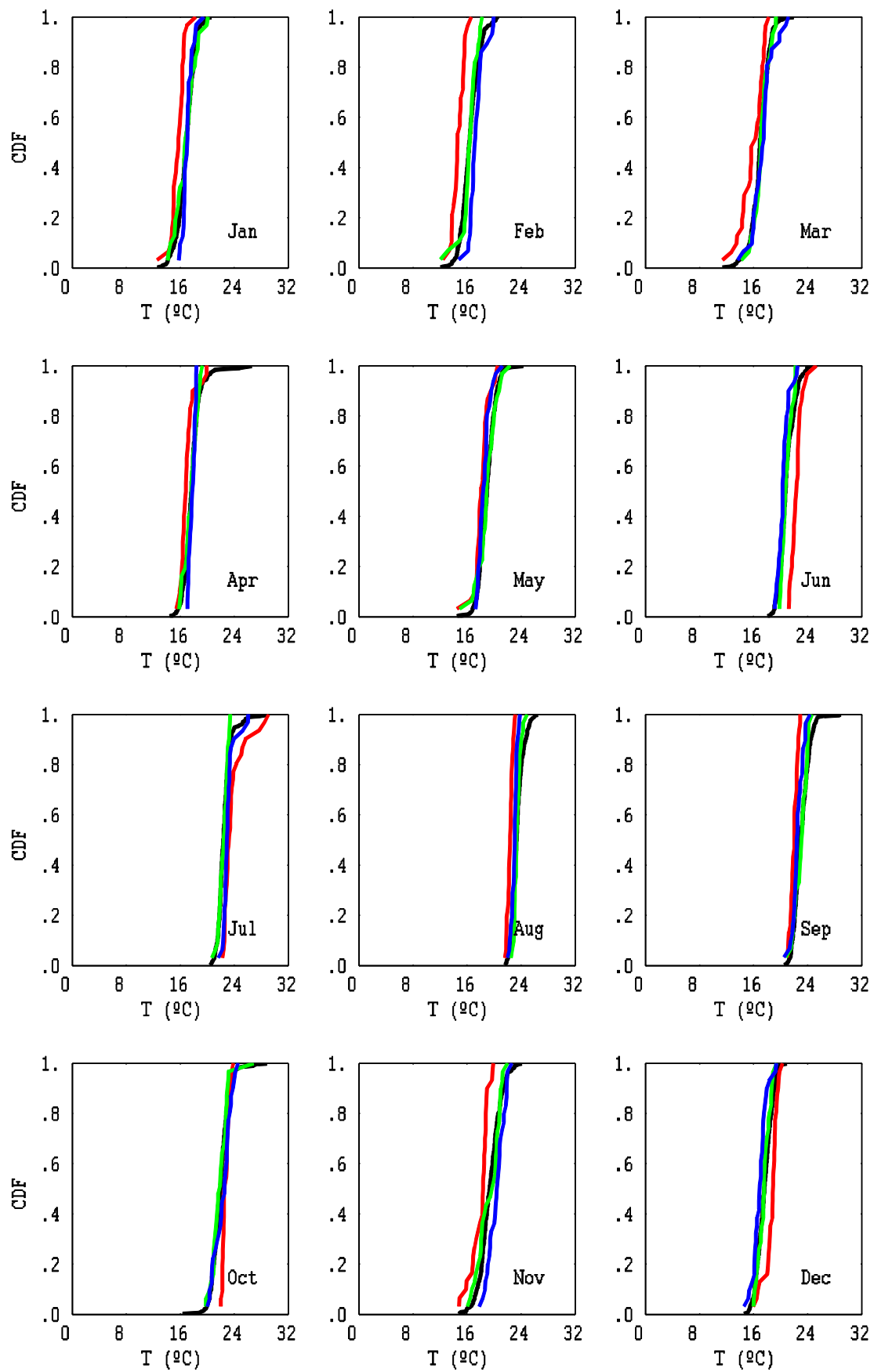


Figura 2.14 – Comparação entre as CDF para a temperatura média do ar na estação do Observatório.

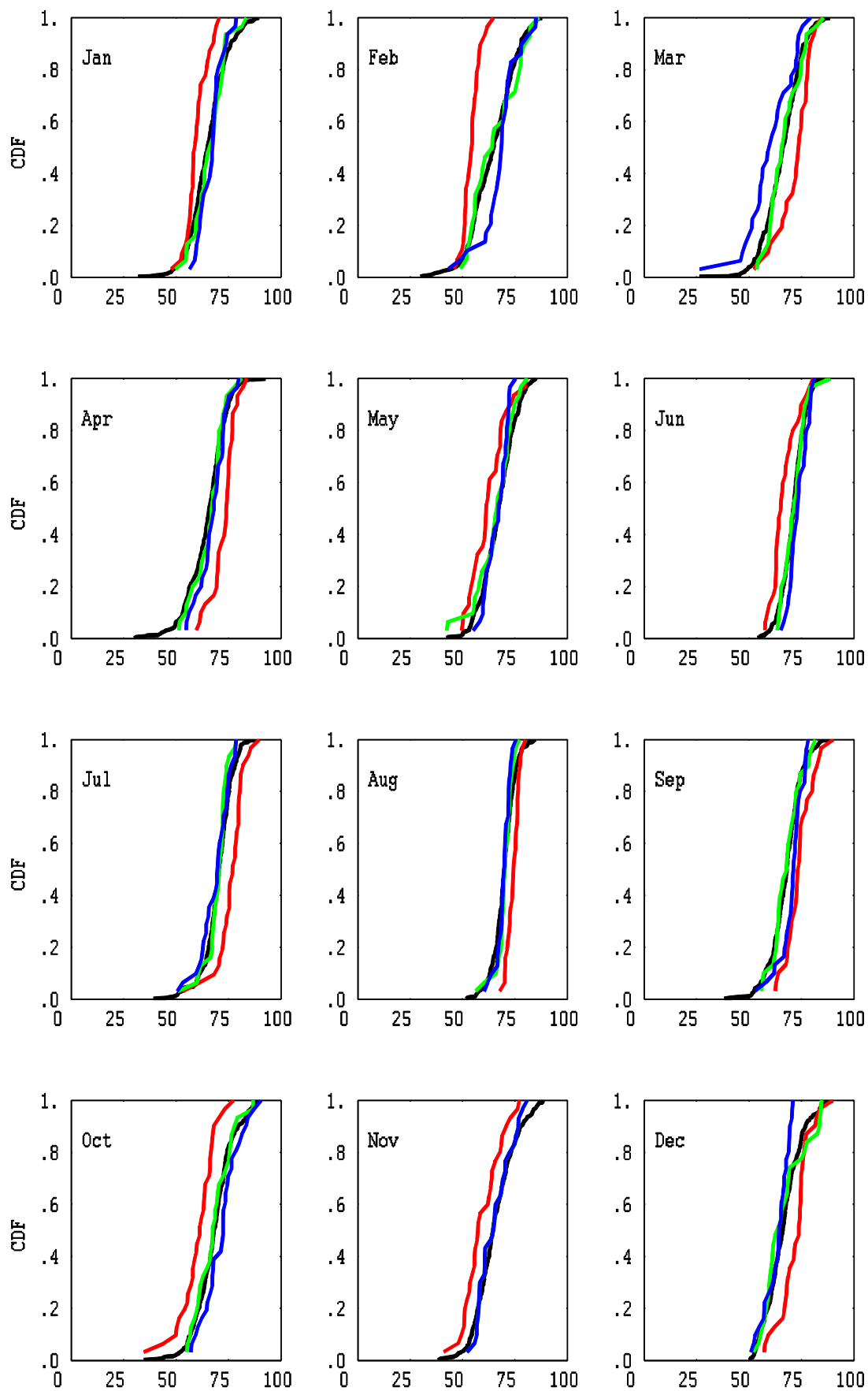


Figura 2.15 – Comparação entre CDF para a humidade relativa média do ar na estação do Observatório.

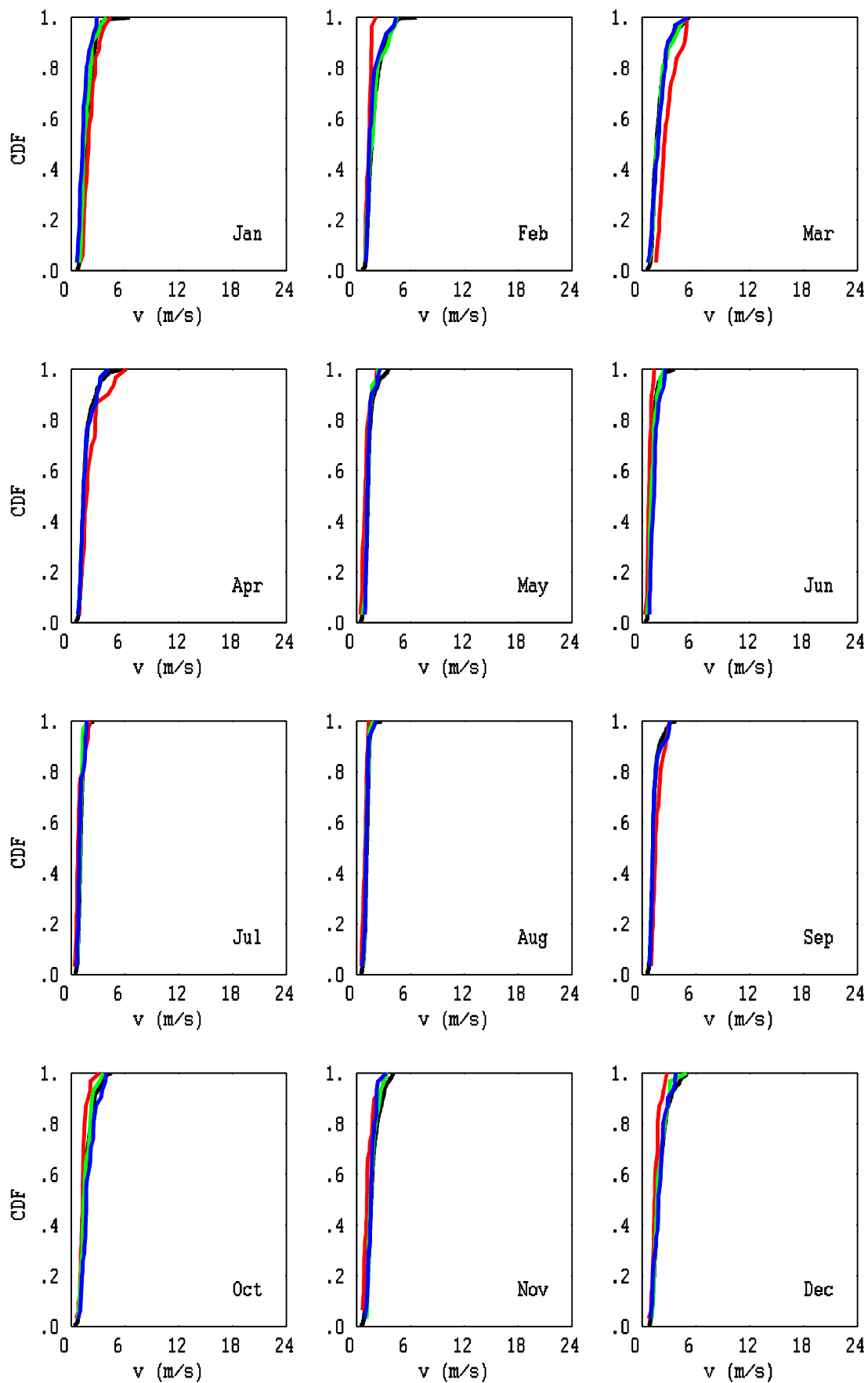


Figura 2.16 – Comparação entre CDF para a intensidade média do vento na estação do Observatório.

Nem sempre o ano com a CDF mais próxima da CDF de longo prazo para uma determinada grandeza é o ano escolhido para ser representado no AMT. Isto acontece porque existem pesos estatísticos diferentes para as várias grandezas meteorológicas como apresentado na Tabela 2.6, sendo o AMT construído com os meses selecionados com base nesses pesos estatísticos. Assim, é possível que a CDF do mês escolhido para integrar o AMT no caso das grandezas com um peso estatístico inferior, como por exemplo a humidade relativa do ar máxima diária, não se encontre próxima da respetiva CDF de longo prazo. Por outro lado, em grandezas como a radiação solar global, que possui um peso estatístico elevado, é expectável que a CDF do ano escolhido para fazer parte do AMT se encontre próxima da CDF de longo prazo, e que em alguns casos a CDF do mês/ano escolhido para o AMT coincida com o ano cuja CDF está mais próxima da CDF de longo prazo para esse mês de calendário. Nestes casos, apenas a CDF escolhida para o AMT foi representada nos gráficos da Figura 2.13, da Figura 2.14, da Figura 2.15 e da Figura 2.16.

Os valores de *FS* obtidos para cada ano e em cada mês de calendário para a radiação solar global na estação do Observatório são apresentados na Tabela 2.7. A soma ponderada (*WS*) para a estação do Observatório é apresentada na Tabela 2.8. Na Tabela 2.7 e na Tabela 2.8, os cinco anos candidatos ao AMT são apresentados a sublinhado enquanto que o ano escolhido para o AMT é apresentado a negrito.

Tabela 2.7 – Valores de *FS* para a radiação solar global na estação do Observatório.

Mês/Ano	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Janeiro	0.666	<u>1.082</u>	5.845	<u>1.645</u>	1.982	<u>1.364</u>	3.748	<u>0.865</u>	1.375	4.243	2.449
Fevereiro	2.857	4.670	<u>2.786</u>	1.814	1.969	<u>2.980</u>	3.049	<u>3.674</u>	1.497	2.956	<u>1.953</u>
Março	2.188	<u>1.886</u>	<u>1.062</u>	1.358	<u>1.217</u>	3.346	4.707	0.686	4.630	1.378	<u>1.123</u>
Abril	4.703	2.561	1.267	<u>1.033</u>	1.430	<u>1.136</u>	<u>1.333</u>	<u>1.527</u>	2.318	1.648	2.812
Mai	3.311	2.487	<u>1.158</u>	<u>1.114</u>	2.293	0.921	<u>2.434</u>	2.569	<u>1.900</u>	4.821	5.595
Junho	2.767	<u>2.691</u>	4.185	<u>1.370</u>	<u>1.191</u>	<u>1.939</u>	2.494	2.176	0.876	1.797	0.752
Julho	2.308	<u>3.226</u>	<u>2.100</u>	3.551	3.117	1.422	4.100	<u>2.378</u>	<u>1.548</u>	2.085	4.707
Agosto	4.853	<u>2.147</u>	<u>2.232</u>	4.457	2.393	2.604	<u>2.079</u>	0.783	<u>1.762</u>	3.733	3.959
Setembro	2.342	<u>1.806</u>	4.052	5.345	0.876	<u>2.033</u>	3.024	<u>1.179</u>	<u>1.812</u>	1.170	1.297
Outubro	5.073	3.220	1.745	2.566	0.921	<u>1.572</u>	<u>2.355</u>	3.100	<u>2.718</u>	1.504	<u>1.862</u>
Novembro	4.061	1.985	<u>1.361</u>	3.000	1.542	0.873	1.473	<u>1.415</u>	<u>2.012</u>	4.897	<u>1.767</u>
Dezembro	<u>1.006</u>	2.449	1.677	<u>2.378</u>	<u>1.211</u>	3.255	2.214	2.258	2.584	<u>1.411</u>	1.053

Tabela 2.8 – Soma ponderada *WS* para a estação do Observatório.

Mês/Ano	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Janeiro	1.623	2.223	4.544	2.132	2.668	1.829	3.084	1.279	2.406	3.301	2.459
Fevereiro	3.323	4.527	2.872	3.061	2.451	2.371	3.535	2.855	3.296	3.127	1.828
Março	2.680	2.125	1.709	1.760	1.518	2.870	3.038	2.252	3.342	3.351	1.952
Abril	4.014	1.952	1.491	1.310	2.040	1.448	1.324	1.568	2.688	1.867	2.830
Maio	3.413	2.394	1.568	1.159	2.282	1.427	2.281	2.431	2.204	4.046	4.356
Junho	3.688	2.132	2.878	1.783	1.947	2.119	3.461	2.770	2.288	2.616	2.045
Julho	3.874	2.571	2.292	3.438	3.136	2.064	3.177	2.849	1.863	2.949	3.857
Agosto	4.788	2.482	2.093	4.025	2.762	2.830	2.361	1.416	2.101	3.299	3.865
Setembro	3.246	1.970	3.159	4.306	1.712	1.982	2.763	1.618	2.355	2.749	2.495
Outubro	3.253	2.865	2.162	2.697	2.279	2.143	2.067	2.881	1.970	2.268	1.849
Novembro	3.166	2.160	2.034	2.351	2.598	1.653	2.144	1.898	2.108	3.586	1.996
Dezembro	2.056	2.158	2.115	2.022	1.878	3.651	2.504	2.587	2.842	1.891	1.950

A *RMSD* calculada para a radiação solar global dos cinco anos candidatos é apresentada na Tabela 2.9 para a estação do Observatório.

Tabela 2.9 – *RMSD* para a estação do Observatório.

Mês/Ano	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Janeiro	0.038	0.070	-	0.045	-	0.040	-	0.034	-	-	-
Fevereiro	-	-	0.143	-	0.068	0.117	-	0.194	-	-	0.109
Março	-	0.074	0.133	0.057	0.108	-	-	-	-	-	0.131
Abril	-	-	0.053	0.077	-	0.132	0.045	0.070	-	-	-
Maio	-	-	0.066	0.062	-	0.062	0.069	-	0.151	-	-
Junho	-	0.117	-	0.060	0.082	0.138	-	-	-	-	0.046
Julho	-	0.196	0.138	-	-	0.053	-	0.146	0.111	-	-
Agosto	-	0.116	0.107	-	-	-	0.135	0.053	0.082	-	-
Setembro	-	0.079	-	-	0.064	0.090	-	0.063	0.090	-	-
Outubro	-	-	0.078	-	-	0.101	0.121	-	0.118	-	0.087
Novembro	-	-	0.043	-	-	0.048	-	0.091	0.073	-	0.074
Dezembro	0.068	-	-	0.055	0.039	-	-	-	-	0.032	0.042

Na Tabela 2.9, foi selecionado o ano com o menor valor de *RMSD* para cada mês de calendário, bem como os anos que se situavam dentro do intervalo $\min\{RMSD\} + 0.02$. Nos casos em que existia mais do que um ano nesse intervalo foi analisado o valor de *FS* da radiação solar global para esses anos e foi escolhido o ano com menor valor de *FS*. Os anos selecionados para o AMT estão assinalados a negrito no caso apresentado na Tabela 2.9. Seguindo este procedimento para todos os meses e para todas as estações meteorológicas analisadas, foi determinado o AMT das diversas estações que está apresentado na Tabela 2.10.

Tabela 2.10 – Determinação do AMT das diferentes estações analisadas.

Estação/Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Observatório	2004	2008	2007	2006	2009	2014	2009	2011	2008	2006	2009	2014
Lido	2009	2006	2005	2010	2005	2003	2012	2010	2012	2013	2009	2008
Areeiro	2007	2003	2004	2010	2012	2012	2005	2009	2013	2013	2009	2005
São Jorge	2010	2006	2004	2006	2003	2005	2014	2009	2010	2003	2007	2007
Lg. de Baixo	2007	2009	2009	2014	2008	2014	2005	2012	2011	2013	2014	2008
Caniçal	2010	2013	2011	2010	2010	2012	2014	2014	2013	2012	2014	2011
P. do Pargo	2013	2011	2011	2010	2012	2013	2012	2014	2010	2009	2011	2013
Lb. da Terça	2010	2013	2014	2010	2010	2014	2012	2013	2014	2013	2010	2014

Na Tabela 2.10, considerando as estações que possuem uma amostra de dados igual, é possível afirmar que, embora a ilha da Madeira não tenha uma grande extensão terrestre, os anos escolhidos para o AMT são diferentes de estação para estação. Isto poderá significar que, atendendo à localização e geografia da ilha, existe alguma variabilidade espacial e temporal das condições meteorológicas e climáticas, as quais são necessárias estudar de forma mais detalhada.

2.4.2. Validação do Ano Meteorológico Típico

Tendo como objetivo a validação dos anos escolhidos para o AMT, bem como a validação do próprio método e respetiva aplicação, foi realizada uma comparação entre as médias mensais de toda a amostra de dados e as médias mensais dos anos escolhidos para o AMT. A comparação entre as médias mensais de longo prazo e o AMT em termos de radiação solar global total mensal, na estação do Observatório, é apresentada na Figura 2.17.

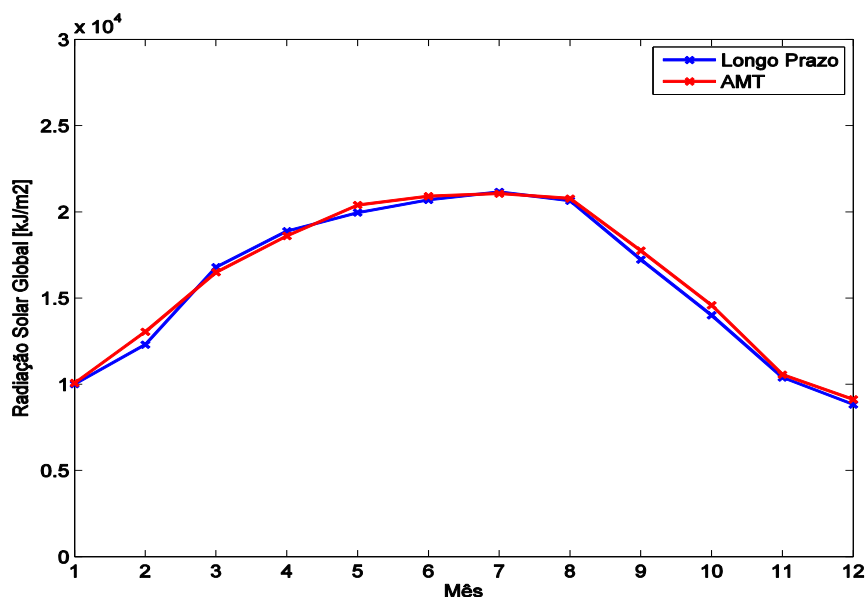


Figura 2.17 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e o AMT da radiação solar global na estação do Observatório.

A comparação entre as médias mensais de longo prazo e o AMT em termos de radiação solar global total mensal, na estação de São Jorge, é apresentada na Figura 2.18. A comparação entre as médias mensais de longo prazo e o AMT em termos de radiação solar global total mensal, na estação do Areeiro, é apresentada na Figura 2.19.

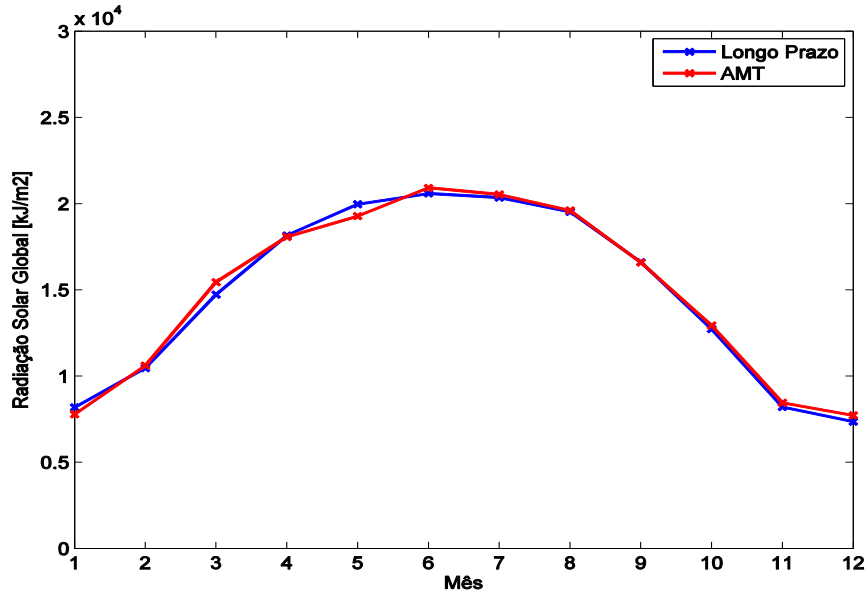


Figura 2.18 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e o AMT da radiação solar global na estação de São Jorge.

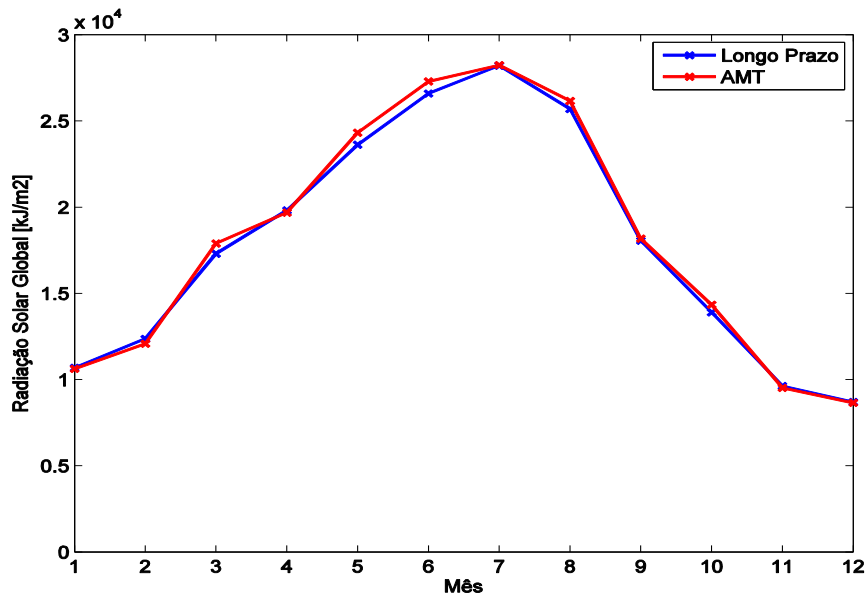


Figura 2.19 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e o AMT da radiação solar global na estação do Areeiro.

Na Figura 2.17, na Figura 2.18 e na Figura 2.19, os anos escolhidos para o AMT apresentam valores mensais muito próximos das médias mensais do total da amostra de dados. Desta forma é possível concluir que o AMT representa toda uma amostra de dados num único ano típico. A comparação entre as médias mensais de longo prazo e o AMT para a radiação solar global, temperatura média do ar e intensidade média do vento, para as restantes estações analisadas, encontra-se no Anexo III.

2.4.3. Resultados

Tendo como objetivo a posterior utilização do AMT no cálculo da produção de energia por via fotovoltaica, foi elaborada, à semelhança do que foi feito na Secção 2.3.2, uma matriz A_{ij} com os valores horários do AMT. Nesta secção, é apresentado o AMT para uma estação da encosta sul (Observatório), uma estação da encosta norte (São Jorge) e uma estação localizada no centro montanhoso da ilha (Areiro). A radiação solar global do AMT, na estação do Observatório, é apresentada na Figura 2.20. A radiação difusa do AMT, na estação do Observatório, é apresentada na Figura 2.21. A radiação solar global do AMT, na estação de São Jorge, é apresentada na Figura 2.22. A radiação solar global do AMT, na estação do Areiro, é apresentada na Figura 2.23.

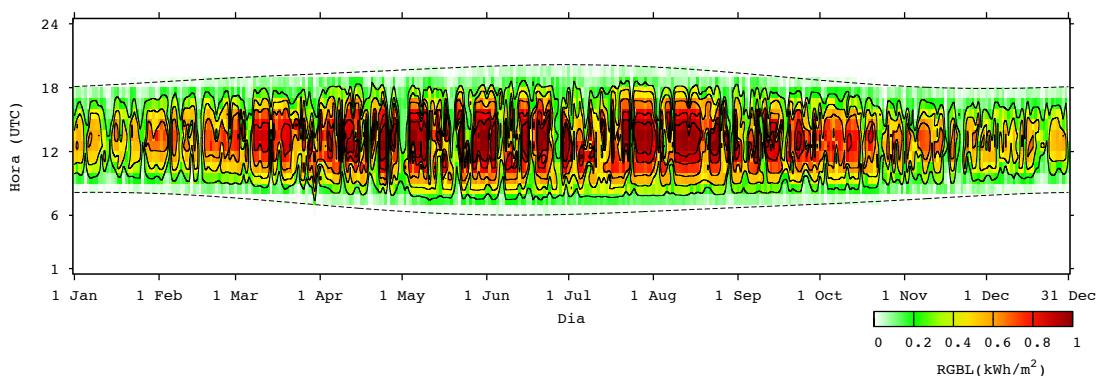


Figura 2.20 - Radiação solar global do AMT na estação do Observatório.

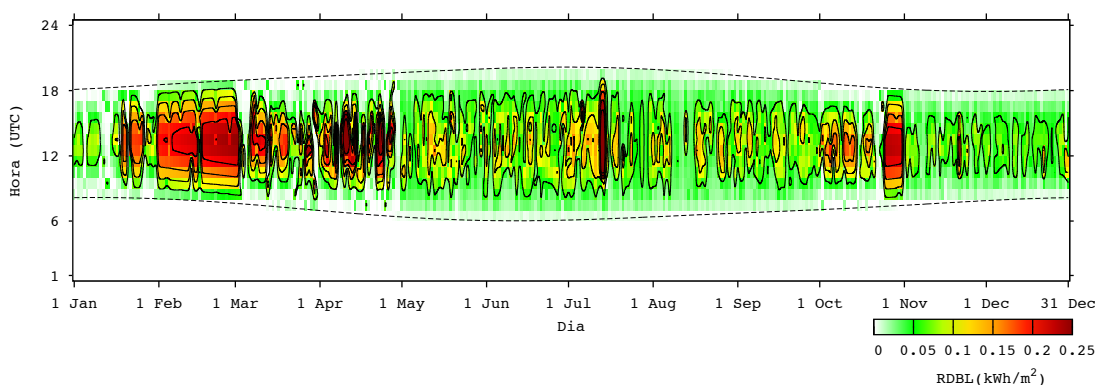


Figura 2.21 - Radiação difusa do AMT na estação do Observatório.

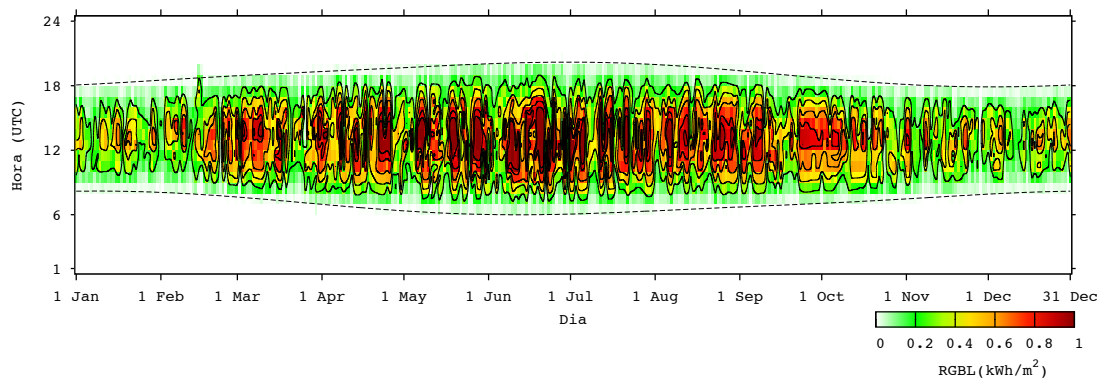


Figura 2.22 - Radiação solar global do AMT na estação de São Jorge.

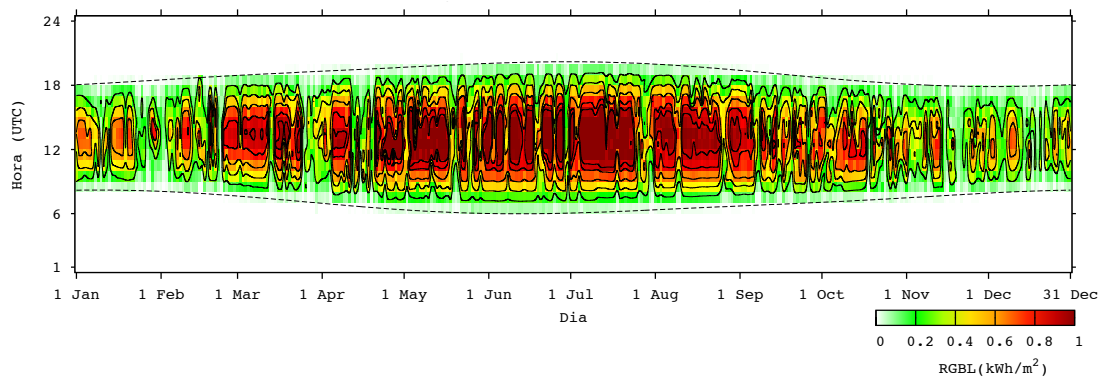


Figura 2.23 - Radiação solar global do AMT na estação do Areiro.

Na Figura 2.20, na Figura 2.22 e na Figura 2.23 é possível identificar as flutuações horárias e diárias da radiação solar global nas diferentes estações do ano como, por exemplo, identificar dias de verão com ocorrência de nuvens. Estas flutuações horárias e diárias constituem a verdadeira vantagem da utilização do AMT em relação aos anos médios aquando da simulação de sistemas fotovoltaicos, uma vez que o AMT é constituído por medições reais que preservam os valores médios mensais, sendo assim possível prever como um sistema de energia responde a uma situação real. Na Figura 2.21, nos meses de Fevereiro e Outubro, existiam lacunas nas medições da radiação difusa, as quais foram preenchidas através das correlações apresentadas na Secção 2.2.2. Este preenchimento não teve impacto na determinação do AMT uma vez que, no método utilizado, o peso estatístico da radiação solar difusa é nulo. No que diz respeito à produção de energia, será mostrado na Secção 4.3 que o impacto da geração de dados de radiação difusa através das correlações é reduzido. A representação da radiação solar global do AMT para as restantes estações analisadas encontra-se no Anexo II.

Capítulo 3 - Modelação do Sistema Fotovoltaico

Neste capítulo é apresentada a modelação que permite simular o funcionamento de uma célula/módulo fotovoltaico através dos dados fornecidos pelo fabricante e da radiação solar incidente, da temperatura ambiente e da intensidade do vento. O algoritmo foi desenvolvido em Matlab.

3.1. Modelação

O modelo usado nesta dissertação para descrever o comportamento de uma célula fotovoltaica é baseado em um díodo e três parâmetros [35].

Os três parâmetros são o fator de idealidade do díodo (m), a corrente inversa de saturação do díodo (I_0) e a corrente gerada por efeito fotovoltaico (I_s) [35].

O circuito elétrico equivalente do modelo de um díodo e três parâmetros é apresentado na Figura 3.1.

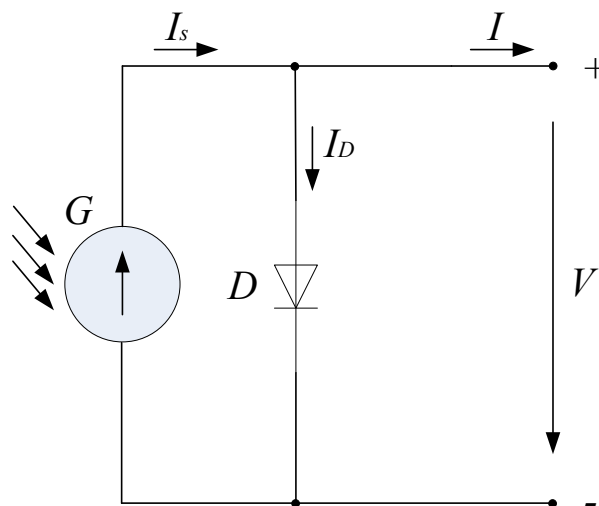


Figura 3.1 - Circuito elétrico equivalente do modelo de três parâmetros.

A fonte de corrente, I_s , representa a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico, sendo esta corrente elétrica unidirecional constante para uma dada radiação incidente G . A corrente I_D representa a troca de eletrões na junção PN que pode ser representada por um díodo D , devido a este ter uma corrente interna unidirecional, que depende da tensão V aos terminais da célula [62].

Em [35], a corrente no díodo I_D é dada por:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (23)$$

sendo I_D a corrente unidirecional no díodo, I_0 a corrente inversa de saturação do díodo, V a tensão aos terminais da célula, m o fator de idealidade do díodo (para o díodo ideal $m=1$, díodo real $m>1$), V_T o potencial térmico.

Em [35], o potencial térmico V_T é dado por:

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (24)$$

sendo K a constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), T a temperatura absoluta da célula, q a carga do eletrão (1.6×10^{-19} C).

Em [35], a corrente I é dada por:

$$I = I_s - I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_t}} - 1 \right) \quad (25)$$

Existem dois pontos de funcionamento da célula fotovoltaica merecedores de atenção especial: o curto-circuito exterior e o circuito aberto. Em [35], as condições de curto-circuito exterior são dadas por:

$$V = 0$$

$$I_D = 0$$

$$I = I_s = I_{SC} \quad (26)$$

A corrente de curto-circuito, I_{SC} , corresponde ao valor máximo da corrente, igual à corrente gerada por efeito fotovoltaico. A corrente de curto-circuito é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para as condições STC [35].

Em [62], as condições de circuito aberto são dadas por:

$$V = V_{OC}$$

$$I = 0$$

$$0 = I_s - I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (27)$$

$$\frac{I_S}{I_0} = e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \quad (28)$$

$$\ln\left(\frac{I_S}{I_0} + 1\right) = \frac{V_{OC}}{mV_T} \quad (29)$$

$$V_{OC} = mV_T \ln\left(\frac{I_S}{I_0} + 1\right) \quad (30)$$

A tensão de circuito aberto, V_{OC} , é o valor máximo de tensão aos terminais da célula fotovoltaica. Esta tensão ocorre quando a célula está em vazio. A tensão de circuito aberto é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para condições STC [62].

Em [35], a potência elétrica de saída P é dada por:

$$P = VI = V\left(I_{SC} - I_0\left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1\right)\right) \quad (31)$$

A potência máxima é obtida através de $dP/dV = 0$ [35]. Assim, derivando a expressão de P e igualando a zero temos:

$$\frac{d}{dV}\left[V\left(I_{SC} - I_0\left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1\right)\right)\right] = 0 \quad (32)$$

$$I_{SC} + I_0\left(1 - e^{\frac{V}{mV_T}} + \frac{V}{mV_T}e^{\frac{V}{mV_T}}\right) = 0 \quad (33)$$

A solução da equação (33), estando na forma implícita em V , apenas pode ser obtida com recurso a um método iterativo, por exemplo o método de Gauss.

Em [35], o ponto de potência máxima é dado por:

$$P_{MP} = I_{MP}V_{MP} \quad (34)$$

Se tivermos em conta a equação (33), teremos $V=V_{MP}$ e a correspondente corrente I_{MP} [35]. Nas condições de referência temos:

$$V = V_{MPr}$$

$$I = I_{MPp}$$

$$P = P_p$$

Os valores de V_{OCr} , I_{SCr} e P_p são valores característicos da célula, sendo fornecidos pelo fabricante para as condições de referência. A maioria dos fabricantes também fornece o valor de V_{MPp} e I_{MPp} [35].

A potência máxima de saída obtida nas condições STC é denominada de potência de pico (*Peak Power* ou MPP - *Maximum Power Point*). O rendimento nas condições de referência, η_r , é definido pela relação entre a potência de pico e a potência da radiação solar incidente [35], dado por:

$$\eta_r = \frac{P_p}{AG_r} \quad (35)$$

sendo P_p a potência de pico, A a área útil da célula (m^2), G_r a radiação solar incidente de referência (W/m^2).

Em [35], outro ponto de funcionamento da célula é dado por:

$$\eta = \frac{P}{AG} \quad (36)$$

sendo G a radiação solar incidente por unidade de área de superfície do módulo (W/m^2).

O fator de forma FF (*Fill Factor*) é definido pela relação entre a potência de pico e o produto V_{OCr} e I_{SCr} [35], e é dado por:

$$FF = \frac{P_p}{I_{SCr}V_{OCr}} \quad (37)$$

Para as células do mesmo tipo, os valores de I_{SCr} e V_{OCr} são aproximadamente constantes. Contudo, a forma da curva I-V pode variar consideravelmente. As células fotovoltaicas em uso comercial apresentam fatores de forma entre 0.7 e 0.85. É desejável trabalhar com células cujo fator de forma seja o mais elevado possível [35].

3.2. Aplicação do Modelo

Os fabricantes de células fotovoltaicas normalmente fornecem os valores de V_{OCr} , I_{SCr} e P_p [35]. Desta forma, é possível definir o fator de idealidade do díodo, m , e a corrente inversa de saturação, I_{0r} , através de:

$$I = I_S - I_{0r} \left(e^{\frac{V}{mV_{Tr}}} - 1 \right) \quad (38)$$

Em [35], o curto-circuito é dado por:

$$I = I_S = I_{SCr} \quad (39)$$

Em [35], o circuito aberto é dado por:

$$I = \frac{I_{SCr}}{\left(e^{\frac{V_{OCr}}{mV_{Tr}}} - 1 \right)} \quad (40)$$

À semelhança de [62], ao utilizar as expressões indicadas e fazendo a substituição na expressão da corrente I , que percorre a carga do modelo, I é dada por:

$$I = I_{SCr} - \frac{I_{SCr}}{\left(e^{\frac{V_{OCr}}{mV_{Tr}}} - 1 \right)} \left(e^{\frac{V}{mV_{Tr}}} - 1 \right) \quad (41)$$

$$I = I_{SCr} \left(1 - \frac{\left(e^{\frac{V}{mV_{Tr}}} - 1 \right)}{\left(e^{\frac{V_{OCr}}{mV_{Tr}}} - 1 \right)} \right) \quad (42)$$

Considerando que $e^{\frac{V}{mV_{Tr}}} \gg 1$ e $e^{\frac{V_{OCr}}{mV_{Tr}}} \gg 1$, fica:

$$I = I_{SCr} \left(1 - \frac{e^{\frac{V}{mV_{Tr}}}}{e^{\frac{V_{OCr}}{mV_{Tr}}}} \right) \quad (43)$$

$$I = I_{SCr} \left(1 - e^{\frac{V-V_{OCr}}{mV_{Tr}}} \right) \quad (44)$$

Através dos valores de V_{MP_r} e de I_{MP_r} disponibilizados pelos fabricantes é possível considerar três pontos de funcionamento do circuito: circuito aberto, curto-circuito e potência máxima, todos em condições STC [35].

Em [35], o circuito aberto é dado por:

$$0 = I_{S_r} - I_{0_r} \left(e^{\frac{V_{OC_r}}{mV_{T_r}}} - 1 \right)$$

Em [35], o curto-circuito é dado por:

$$I_{S_r} = I_{SC_r}$$

Em [35], o ponto de potência máxima é dado por:

$$I_{MP_r} = I_{S_r} - I_{0_r} \left(e^{\frac{V_{MP_r}}{mV_{T_r}}} - 1 \right)$$

Se, na expressão de I_{MP_r} forem substituídos os valores de I_{S_r} e de I_{0_r} , obtidos através dos pontos de funcionamento em circuito aberto e em curto-circuito [35], I_{MP_r} é dada por:

$$I_{MP_r} = I_{SC_r} \left(1 - e^{\frac{V - V_{OC_r}}{mV_{T_r}}} \right) \quad (45)$$

À semelhança de [35], explicitando a expressão em função do fator de idealidade do díodo m , podemos determinar m através de:

$$m = \frac{V_{MP_r} - V_{OC_r}}{V_{T_r} \ln \left(1 - \frac{I_{MP_r}}{I_{SC_r}} \right)} \quad (46)$$

Assim, obtido o valor do fator de idealidade do díodo, é possível obter o valor da corrente inversa de saturação nas condições de referência, I_{0_r} , através das equações correspondentes aos pontos de circuito aberto e curto-circuito [35]. I_{0_r} é dada por:

$$I_{0_r} = \frac{I_{SC_r}}{\left(e^{\frac{V_{OC_r}}{mV_{T_r}}} - 1 \right)} \quad (47)$$

3.3. Algoritmo de Simulação

O algoritmo de simulação foi desenvolvido em Matlab, sendo a sequência de cálculo para a determinação dos parâmetros que caracterizam a célula fotovoltaica e a potência de saída da célula apresentada na Figura 3.2.

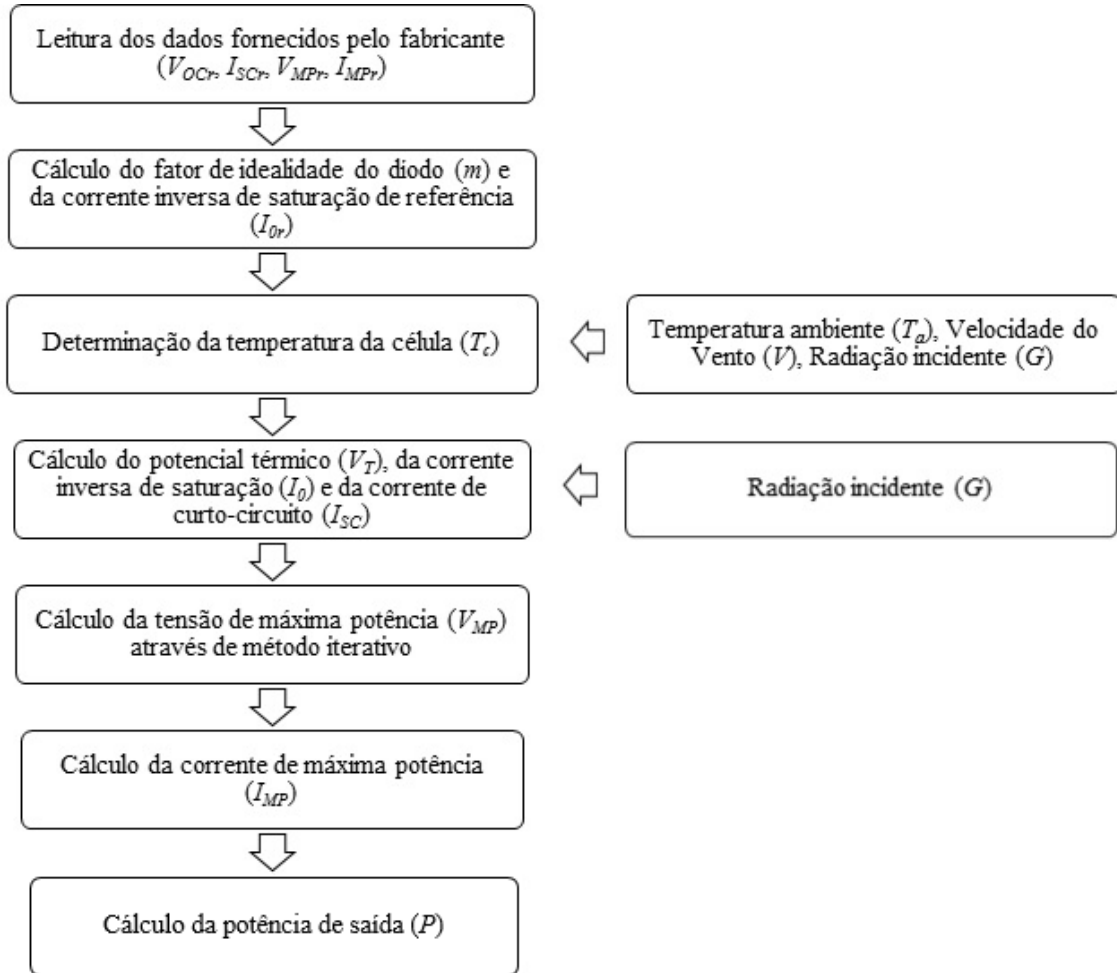


Figura 3.2 - Algoritmo de simulação da produção de energia.

O algoritmo usado é baseado no modelo descrito na Secção 3.1 e na Secção 3.2. São calculados os parâmetros do modelo (I_s , I_0 e m) através dos dados fornecidos pelo fabricante (V_{OCr} , I_{SCr} , V_{MPPr} e I_{MPPr}), e é calculada a temperatura da célula (T_c) em função da radiação incidente (G), da temperatura ambiente (T_a) e da intensidade do vento (V). Seguidamente são calculados o potencial térmico (V_T) e a corrente inversa de saturação (I_{0r}). A corrente de curto-circuito (I_{SC}) é calculada de acordo com a radiação incidente (G). Usando os parâmetros calculados anteriormente é determinada a tensão e a corrente de máxima potência (V_{MP} e I_{MP} , respetivamente), sendo finalmente obtida a potência de saída da célula (P). Este algoritmo será usado para estudar o efeito da temperatura e da radiação solar incidente na célula fotovoltaica, na validação do modelo para condições NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*) e, no Capítulo 4, para estimar a

produção de energia elétrica nos locais das diferentes estações meteorológicas da ilha da Madeira consideradas neste trabalho.

3.3.1. Efeito da Temperatura da Célula e da Radiação Solar Incidente

A temperatura e a radiação solar incidente afetam de maneira determinante o funcionamento da célula fotovoltaica [35]. De seguida são apresentados os efeitos no ponto de funcionamento das células devido à variação da temperatura da célula (T_c) e da radiação incidente (G).

Efeito da temperatura

Para estudar o efeito da temperatura foi usado o algoritmo descrito no início da Secção 3.3, à exceção do módulo que determina a temperatura da célula. A temperatura da célula foi imposta em vários valores de teste de modo a obter uma melhor percepção do seu efeito, para um valor de radiação incidente de 1000 W/m^2 . À semelhança de [63], a corrente de curto-circuito da célula é dada por:

$$I_{SC} = I_{SCr} \frac{G}{G_r} [1 + \alpha(T_c - T_r)] \quad (48)$$

sendo α o coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito, fornecido pelo fabricante. Com o aumento da temperatura da célula ocorre uma diminuição da potência de saída e da tensão de circuito aberto, V_{OC} . Ocorre uma variação na corrente inversa de saturação do díodo, I_0 , e um aumento na corrente de curto-circuito, I_{SC} . O efeito do aumento da temperatura numa célula fotovoltaica é apresentado na Figura 3.3.

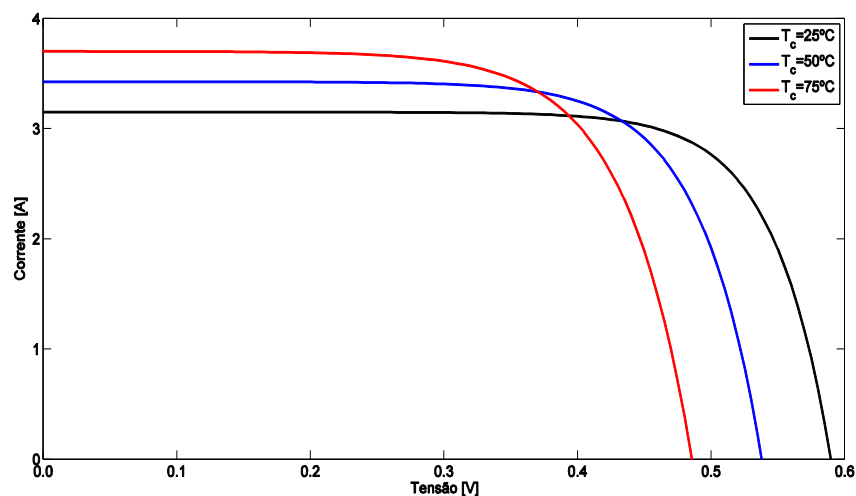


Figura 3.3 - Efeito do aumento da temperatura numa célula fotovoltaica.

Na Figura 3.3, é verificada a relação direta entre o aumento da temperatura da célula, T_c , e a diminuição da tensão de circuito aberto, V_{OC} . Embora a corrente de curto-circuito, I_{SC} , aumente ligeiramente com a temperatura da célula, a potência de saída, P , diminui devido à diminuição da tensão de circuito aberto V_{OC} .

Efeito da radiação solar incidente

Para estudar o efeito da radiação solar incidente foi usado o algoritmo descrito no início da Seção 3.3, à exceção do módulo que determina a temperatura da célula. A temperatura da célula foi imposta em T_r e foram atribuídos vários valores de teste para a radiação incidente. Com o aumento da radiação incidente na célula é observado um aumento da potência de saída da célula, P_{MP} , e uma variação linear da corrente de curto-circuito, I_{SC} . Ocorre uma variação na corrente inversa de saturação do diodo, I_0 , e um aumento da tensão de circuito aberto, V_{OC} .

A corrente de curto-circuito, I_{SC} , apresenta uma variação linear com a radiação solar incidente, G , enquanto que a tensão de circuito aberto, V_{OC} , aumenta ligeiramente. O efeito da variação da radiação solar incidente numa célula fotovoltaica é apresentado na Figura 3.4.

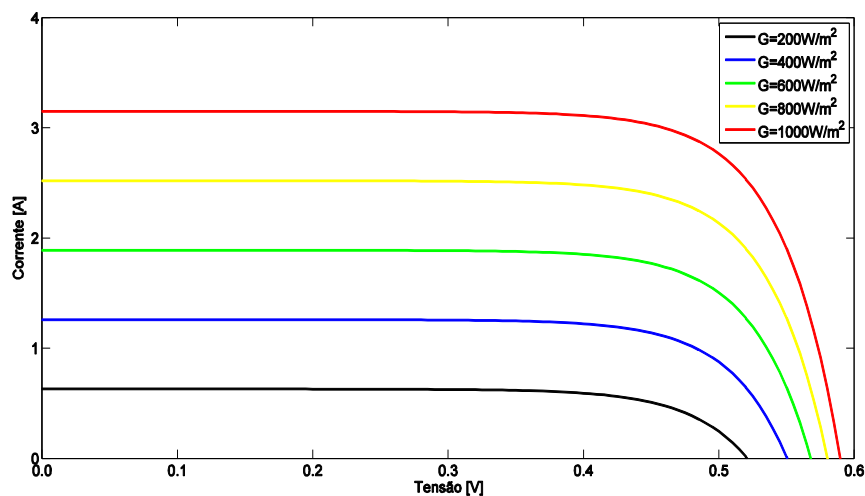


Figura 3.4 - Efeito da variação da radiação solar incidente numa célula fotovoltaica.

Na Figura 3.4, é verificada a diminuição da corrente e da tensão com a diminuição da radiação incidente, G , o que significa que a potência de saída da célula, P_{MP} , está diretamente relacionada com a radiação solar incidente na célula, G .

3.3.2. Determinação da Temperatura da Célula

Foram analisados dois modelos presentes na literatura, apresentados em [50] e em [51], que permitem determinar a temperatura da célula fotovoltaica, T_c , em função da

temperatura ambiente, T_a , e da intensidade do vento, V , que são grandezas meteorológicas disponíveis no AMT. O modelo apresentado em [51] é dado por:

$$T_c = T_a + Ge^{-3.473-0.0594V} \quad (49)$$

sendo G é a radiação incidente. O modelo apresentado em [50] é dado por:

$$T_c = \frac{U_{PV}T_a + G(\tau\alpha - \mu_m - \gamma\mu_m T_{rM})}{U_{PV} - \gamma * \mu_m G} \quad (50)$$

sendo $\tau\alpha$ a transmissividade x absortividade (valor típico: $\tau\alpha=0.81$), μ_m a eficiência da célula, γ o coeficiente de temperatura de potência máxima, fornecido pelo fabricante, T_{rM} a temperatura de referência usada em [50] e U_{PV} é dado por:

$$U_{PV} = 26.6 + 2.3V \quad (51)$$

A comparação entre o modelo apresentado em [50] e o modelo apresentado em [51] é mostrada na Figura 3.5.

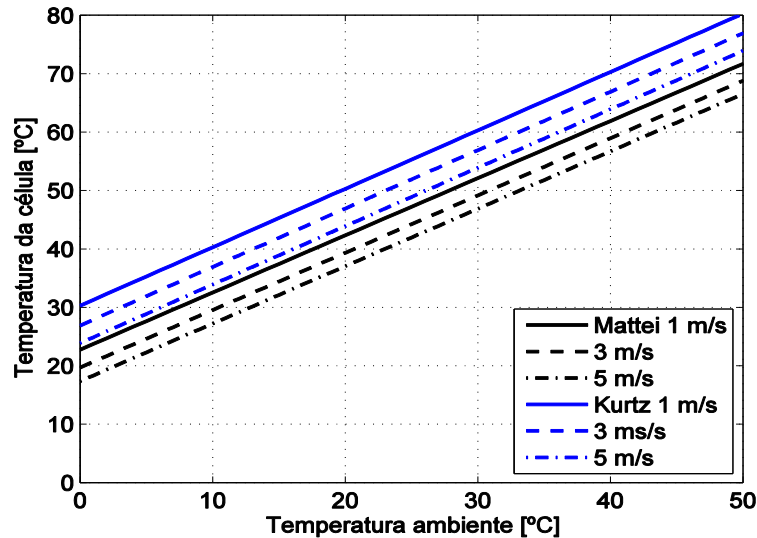


Figura 3.5 - Comparação entre modelos para determinação da temperatura da célula.

Na Figura 3.5, o modelo apresentado em [51] estima temperaturas superiores independentemente da intensidade do vento. O modelo escolhido foi o apresentado em [50] dado por (50) e (51). Este modelo foi considerado o mais completo uma vez que incorpora grandezas como a intensidade do vento, a eficiência da célula, o coeficiente de temperatura para a potência máxima do módulo fotovoltaico e o fator $\tau\alpha$.

3.4. Validação do Modelo

Para efetuar a validação do modelo de simulação construído foi utilizado o algoritmo descrito na Secção 3.3, sendo feita a comparação entre as curvas I-V geradas pelo modelo e as curvas fornecidas pelos fabricantes de módulos fotovoltaicos constituídos por células de silício policristalino, para as mesmas condições. Foram comparadas as curvas para as condições STC (*Standart Test Conditions*), impondo o valor de temperatura da célula para essas condições em vez de utilizar o módulo de cálculo da temperatura da célula, e para as condições NOCT (*Normal Operating Cell Temperature*). O resumo das condições STC e NOCT é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Condições STC e NOCT.

Condição de teste	Irradiância [W/m²]	Massa de Ar (AM)	Temperatura da célula [°C]	Temperatura ambiente [°C]	Intensidade do Vento [m/s]
STC	1000	1.5	25	-	-
NOCT	800	1.5	-	20	1

Nas condições STC a temperatura ambiente e a velocidade do vento são irrelevantes pois este teste é efetuado em condições controladas e a temperatura da célula é a temperatura de referência. As condições NOCT têm, como o próprio nome indica, o objetivo de descrever o comportamento da célula/módulo fotovoltaico em condições normais de operação. Uma vez que a temperatura da célula depende diretamente do tipo de módulo, a referência para estas condições de teste é a temperatura ambiente e não a temperatura da célula. Por outro lado, a atmosfera absorve e dispersa parte da radiação solar de forma diferente em função do comprimento de onda e esse efeito é representado através da definição da Massa de Ar (AM), que depende do ângulo solar zenital, que determina a intensidade e a distribuição espectral da radiação solar que chega à superfície da Terra. Quanto mais elevado for o valor de AM menos radiação solar chegará ao solo, pois uma maior fração de radiação solar será absorvida, dispersa e refletida pela atmosfera. Para as latitudes médias na Europa o valor típico de AM usado no estudo de sistemas fotovoltaicos é 1.5, valor esse que é usado também como referência nos testes efetuados aos módulos fotovoltaicos [35].

Foram utilizados cinco módulos fotovoltaicos de diferentes potências de pico para validar o modelo proposto. As características dos módulos fotovoltaicos para a validação do modelo de um díodo e três parâmetros em condições STC são apresentadas na Tabela 3.2. As características dos módulos fotovoltaicos para a validação do modelo de um díodo e três parâmetros em condições NOCT são apresentadas na Tabela 3.3. Outras características dos módulos fotovoltaicos, tais como a temperatura NOCT e a área útil, são apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.2 - Características dos módulos fotovoltaicos para a validação do modelo de um díodo e três parâmetros em condições STC.

Módulos	$P_p [W]$	$V_{MP} [V]$	$I_{MP} [A]$	$V_{oc} [V]$	$I_{sc} [A]$	$\mu_m [%]$
Módulo 1	50	17.5	2.90	21.8	3.20	11.1
Módulo 2	100	17.0	5.88	21.5	6.55	12.9
Módulo 3	135	17.7	7.63	22.1	8.37	16.0
Módulo 4	250	30.5	8.27	37.6	8.81	15.0
Módulo 5	300	36.2	8.29	44.9	8.72	15.4

Tabela 3.3 - Características dos módulos fotovoltaicos para a validação do modelo de um díodo e três parâmetros em condições NOCT.

Módulos	$P_p [W]$	$V_{MP} [V]$	$I_{MP} [A]$	$V_{oc} [V]$	$I_{sc} [A]$
Módulo 1	36	15.6	2.32	19.8	2.59
Módulo 2	72.6	15.5	4.68	19.2	5.31
Módulo 3	95	15.6	6.10	19.9	6.82
Módulo 4	185.4	27.8	6.68	34.2	7.24
Módulo 5	222	33.2	6.68	41.9	7.07

Tabela 3.4 - Outras características dos módulos fotovoltaicos para validação do modelo.

Módulos	$A_M [m^2]$	$NOCT [^\circ C]$	$\gamma [W/^\circ C]$	$\alpha [A/^\circ C]$	N_s
Módulo 1	0.650	47	-0.450	0.00105	36
Módulo 2	0.701	46	-0.450	6.00×10^{-4}	36
Módulo 3	0.876	49	-0.614	5.01×10^{-3}	36
Módulo 4	1.46	46	-0.450	0.000810	60
Módulo 5	1.75	45	-0.460	0.000700	72

Na Tabela 3.4, A_M é a área útil dos módulos e NOCT é a *Nominal Operating Cell Temperature*, que representa a temperatura alcançada pelo módulo em condições de teste NOCT. As curvas I-V e de potência para o módulo 1 são apresentadas na Figura 3.6. As curvas I-V e de potência para o módulo 2 são apresentadas na Figura 3.7. As curvas I-V e de potência para o módulo 3 são apresentadas na Figura 3.8. As curvas I-V e de potência para o módulo 4 são apresentadas na Figura 3.9. As curvas I-V e de potência para o módulo 5 são apresentadas na Figura 3.10. As linhas a cheio representam as curvas do fabricante. As linhas a tracejado representam as curvas do modelo proposto. Os símbolos (círculos) correspondem aos pontos de máxima potência, MPP.

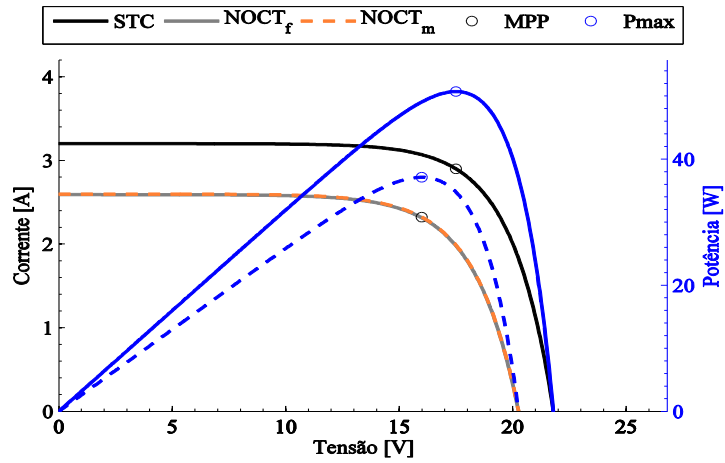


Figura 3.6 - Validação do modelo de três parâmetros para o módulo 1.

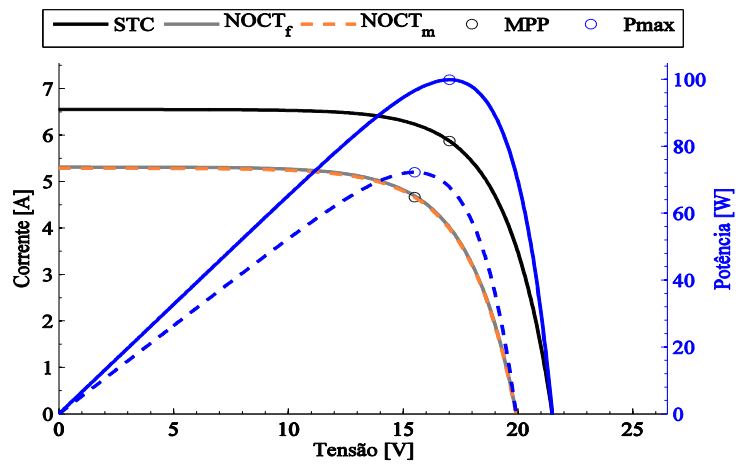


Figura 3.7 - Validação do modelo de três parâmetros para o módulo 2.

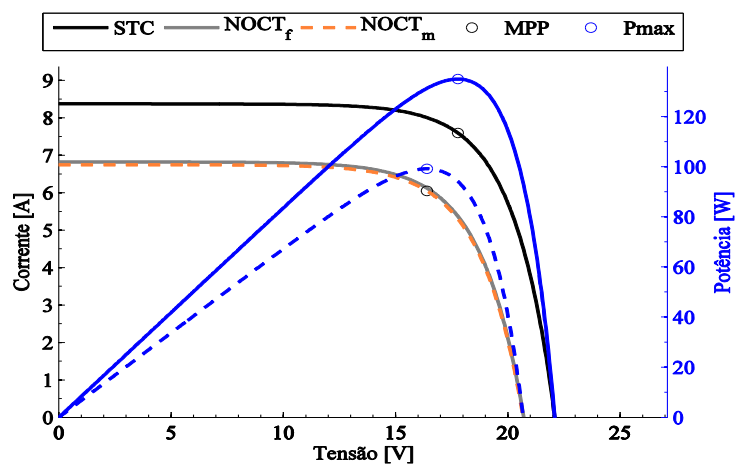


Figura 3.8 - Validação do modelo de três parâmetros para o módulo 3.

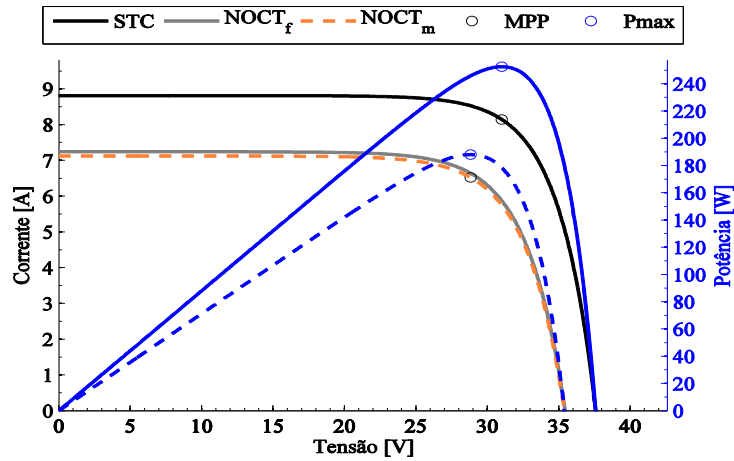


Figura 3.9 - Validação do modelo de três parâmetros para o módulo 4.

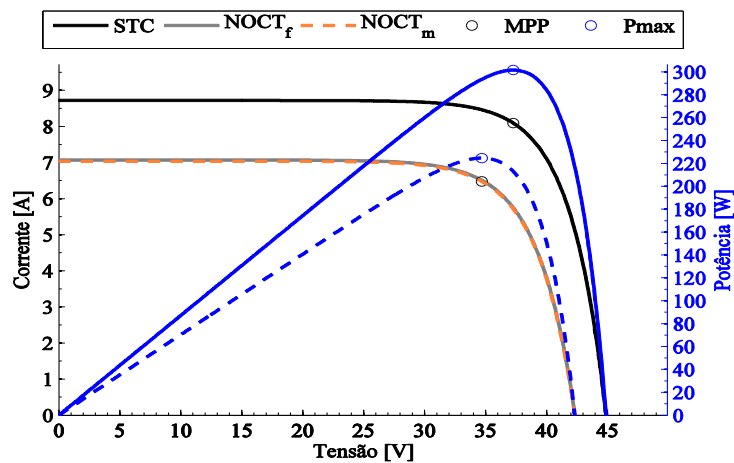


Figura 3.10 - Validação do modelo de três parâmetros para o módulo 5.

Na Figura 3.6, na Figura 3.7, na Figura 3.8, na Figura 3.9 e na Figura 3.10, as curvas do modelo em condições NOCT estão praticamente sobrepostas às curvas fornecidas pelo fabricante dos módulos fotovoltaicos. Em condições STC apenas as curvas do fabricante dos módulos fotovoltaicos são apresentadas. Foi feita esta opção para não sobrecarregar as figuras, uma vez que as curvas têm desvios muito pequenos. Os desvios de potência do modelo de um diodo e três parâmetros para condições STC são apresentados na Tabela 3.5. Os desvios de potência do modelo de um diodo e três parâmetros para condições NOCT, são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.5 - Desvios de potência do modelo de um díodo e três parâmetros para condições STC.

Módulo	P_p fabricante [W]	P_{MP} modelo [W]	Desvio de Potência [%]
1	50	50.71	1.42
2	100	99.88	-0.12
3	135	134.97	-0.02
4	250	252.55	1.02
5	300	301.57	0.52

Tabela 3.6 - Desvios de potência do modelo de um díodo e três parâmetros para condições NOCT.

Módulo	P_{MP} fabricante [W]	P_{MP} modelo [W]	Desvio de Potência [%]
1	36	37.1	3.06
2	72.6	72.2	-0.55
3	95	95.5	0.53
4	185.4	182.9	-1.35
5	222	218.4	-1.62

Na Tabela 3.5 e na Tabela 3.6, os desvios de potência entre as curvas geradas pelo modelo e as curvas fornecidas pelo fabricante são pequenos, sendo ligeiramente maiores para condições NOCT. Porém, foi considerado que um desvio máximo de 3.06% é aceitável, sendo assim demonstrado que o modelo desenvolvido apresenta uma boa aproximação ao real funcionamento de um módulo fotovoltaico.

Capítulo 4 - Estimativa da Produção de Energia Usando o AMT

Neste capítulo é apresentada a conversão das medições de radiação solar para o plano inclinado e é realizada uma estimativa da energia elétrica produzida por origem fotovoltaica nos locais das estações meteorológicas analisadas. Esta estimativa de produção de energia foi realizada recorrendo ao modelo de módulo fotovoltaico apresentado no Capítulo 3, utilizando o AMT construído no Capítulo 2.

4.1. Determinação da Radiação Solar Incidente num Plano Inclinado

A conversão das medições de radiação solar global e radiação difusa no plano horizontal para radiação incidente num plano inclinado foi realizada através da seguinte expressão [59]:

$$G_t = R_B G_B + G_D \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + \rho_G (G_B + G_D) \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (52)$$

sendo o fator de inclinação, R_B , dado por

$$R_B = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\Phi)} \quad (53)$$

com

$$\cos(\theta) = \sin(L - \beta) \sin(\delta) + \cos(L - \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (54)$$

e $\cos(\Phi)$ dado pela equação (5),

sendo G_t a radiação solar incidente no plano inclinado, G_B a componente da radiação solar direta numa superfície horizontal, G_D a radiação difusa no plano horizontal, β a inclinação do módulo fotovoltaico, ρ_G o albedo do meio envolvente (valor típico: $\rho_G=0.1$), θ o ângulo de incidência, Φ o ângulo de zênite, L a latitude, i o dia juliano, h_a a hora solar aparente. O fator de vista entre o módulo e o céu (semi-hemisfério) é dado por $[(1 + \cos(\beta))/2]$. O fator de vista entre o módulo e o solo envolvente é dado por $[(1 - \cos(\beta))/2]$.

A componente da radiação solar direta numa superfície horizontal foi calculada através da diferença entre a radiação solar global no plano horizontal e a radiação difusa no plano horizontal. A radiação incidente no plano horizontal e no plano inclinado são apresentadas na Figura 4.1.

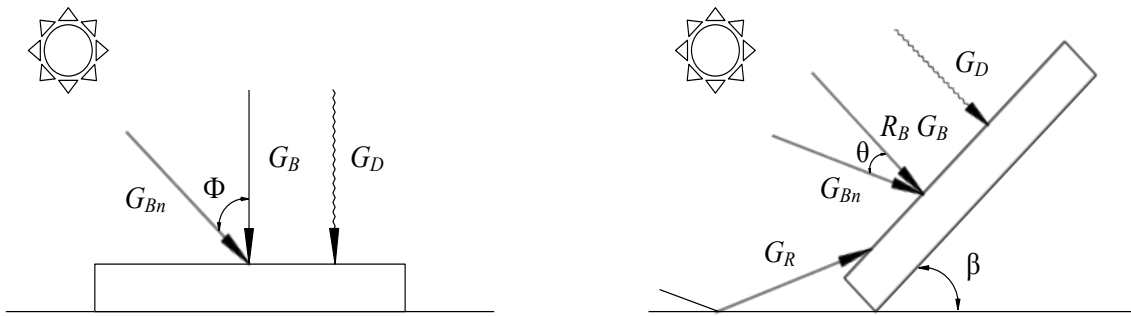


Figura 4.1 - Radiação incidente no plano horizontal e no plano inclinado.

Uma vez que o AMT tem medições (médias) horárias, o cálculo do $\cos(\theta)$ e do $\cos(\Phi)$ foi efetuado para o instante médio desse intervalo de tempo, exceto nas horas durante as quais ocorre o nascer ou o pôr-do-sol em que $\cos(\theta)$ e $\cos(\Phi)$ foram calculados para o instante médio entre o nascer e o pôr do sol e a horas certas (inteiras) imediatamente posteriores e anteriores, respectivamente, de acordo com as equações (7), (8) e (9). Além disso, quando $\cos(\theta) < 0$ (radiação solar direta incidente na parte de trás do módulo) ou $\cos(\Phi) < 0$ (sol abaixo da linha do horizonte), o R_B foi igualado a 0, o que faz com que apenas radiação difusa e refletida incidam no módulo fotovoltaico, caso existam.

4.2. Estimativa da Produção de Energia Elétrica

Através do modelo descrito na seção 3.1 foi feita a estimativa de produção de energia elétrica para o módulo 4 usando o ano meteorológico típico (AMT) construído para os diferentes locais das estações meteorológicas consideradas. O potencial de produção de energia elétrica do local, é apresentado na forma de fator de produção Y_F [52], dado por:

$$Y_F = \frac{E_{AC}}{P_p} \quad (55)$$

sendo E_{AC} a energia elétrica produzida pelo sistema fotovoltaico, em Wh, e P_p a potência de pico do sistema, em W.

Foi realizada uma otimização da inclinação dos módulos fotovoltaicos, com o intuito de maximizar o Y_F . A otimização da inclinação para a estação do Observatório é apresentada na Figura 4.2.

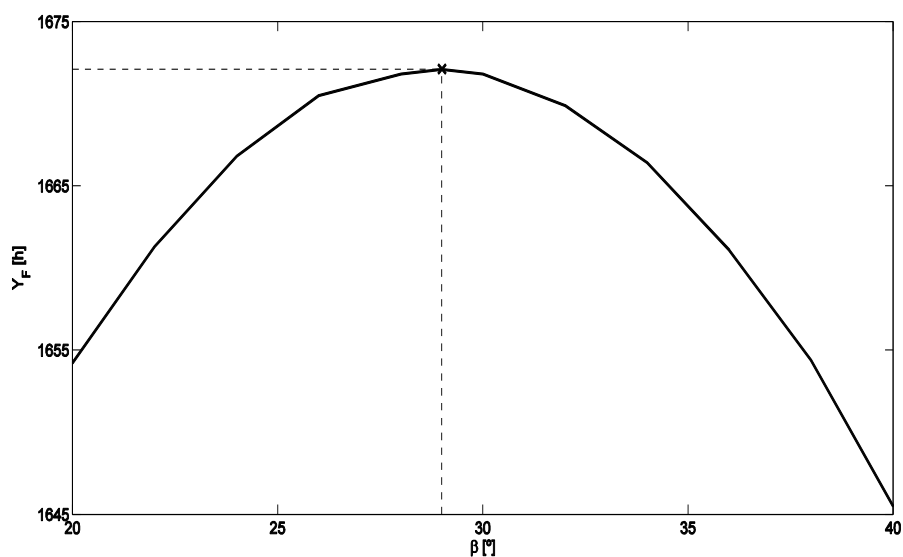


Figura 4.2 - Otimização da inclinação dos módulos fotovoltaicos para a estação do Observatório.

Na Figura 4.2, o valor máximo de Y_F anual (1672.1 horas), que corresponde à máxima produção de energia por parte do sistema fotovoltaico na estação do Observatório, foi obtido para uma inclinação dos módulos fotovoltaicos de 29° , inclinação essa utilizada em todos os cálculos seguintes. Os valores de inclinação ótima e de Y_F para os restantes locais foram calculados usando os dados de radiação difusa gerados através do método descrito na Secção 2.2.2. Os valores de inclinação e Y_F anual ideais para os locais analisados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores de inclinação e Y_F anual ideais para os locais analisados.

Estação	Inclinação ideal (β) [$^\circ$]	Y_F anual [horas]
Areeiro	23	1922.1
Caniçal	23	1693.6
Lido	26	1632.2
Observatório	29	1672.1
Lombo da Terça	22	1551.0
Lugar de Baixo	26	1749.6
Ponta do Pargo	24	1811.4
São Jorge	24	1508.5

Na Tabela 4.1, a estação com Y_F mais elevado é a estação do Areeiro. As estações da encosta sul (Observatório, Lido, Lugar de Baixo, Ponta do Pargo e Caniçal) apresentam um Y_F mais elevado em comparação com as estações localizadas na encosta norte da ilha (Lombo da Terça e São Jorge). As inclinações, β , obtidas para as estações são

relativamente baixas. Uma explicação para este facto é o efeito da temperatura na produção de energia elétrica de origem fotovoltaica.

O fator de produção, Y_F , para a estação do Observatório é apresentado na Figura 4.3. O fator de produção, Y_F , para a estação do Areeiro é apresentado na Figura 4.4. O fator de produção, Y_F , para a estação de São Jorge é apresentado na Figura 4.5.

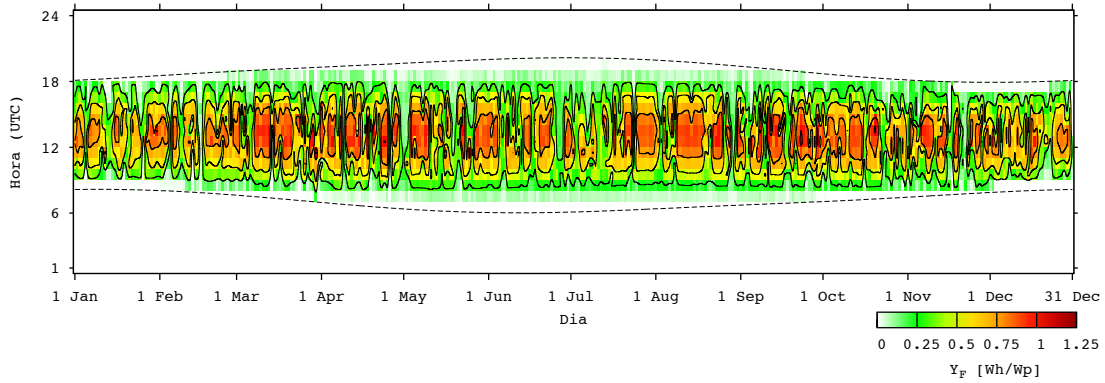


Figura 4.3 - Fator de produção, Y_F , para a estação do Observatório.

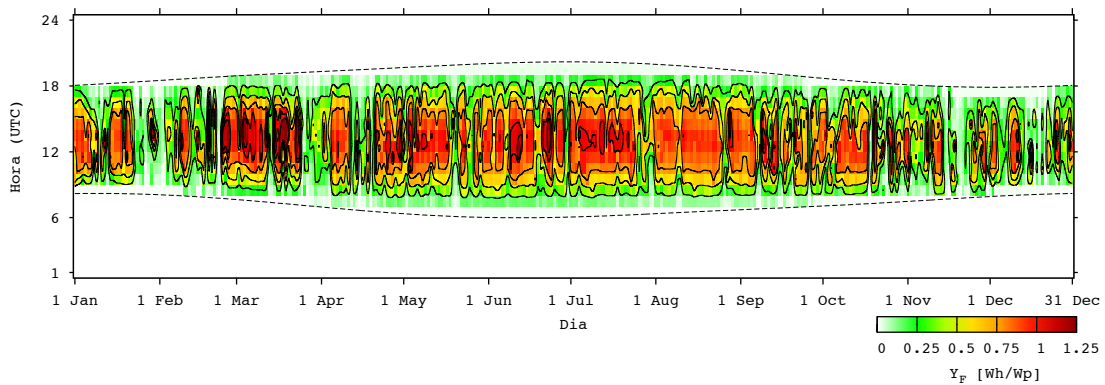


Figura 4.4 - Fator de produção, Y_F , para a estação do Areeiro.

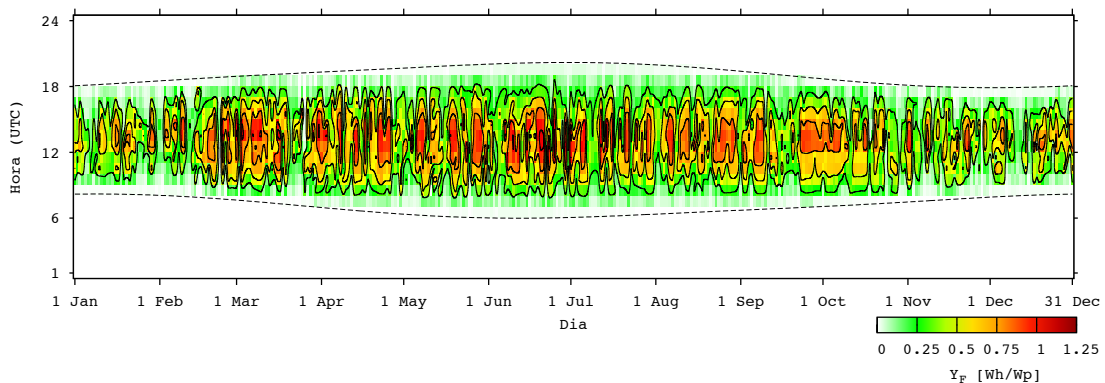


Figura 4.5 - Fator de produção, Y_F , para a estação de São Jorge.

Na Figura 4.3, na Figura 4.4 e na Figura 4.5, a estação com Y_F mais elevado é a estação do Areeiro pelo facto de existir mais radiação solar disponível mas também pelo facto da temperatura média do ar ser mais baixa comparativamente às restantes estações, o

que beneficia a produção de energia pelos sistemas fotovoltaicos. Outra razão para o Y_F ser mais elevado na estação do Areiro é a altitude a que se encontra a estação, o que faz com que a radiação sofra menos absorção e dispersão na atmosfera. A estação com menor valor total de radiação solar incidente é a estação de São Jorge e isso é refletido no Y_F , razão pela qual a estação de São Jorge é a estação que possui o menor valor de Y_F indicado Tabela 4.1.

Com o objetivo de melhor compreender o perfil de produção de energia do sistema fotovoltaico, foi calculada a média mensal dos valores horários de Y_F . Esta média mensal, quando multiplicada pelo número de dias do mês e somando todos os meses, corresponde ao valor anual de Y_F . O Y_F horário médio mensal para a estação do Observatório é apresentado na Figura 4.6. O Y_F horário médio mensal para a estação do Areiro é apresentado na Figura 4.7. O Y_F horário médio mensal para a estação de São Jorge é apresentado na Figura 4.8. As curvas representadas a tracejado representam o dia do respetivo mês com o valor mais elevado de Y_F , ou seja, o dia do mês com maior produção de energia.

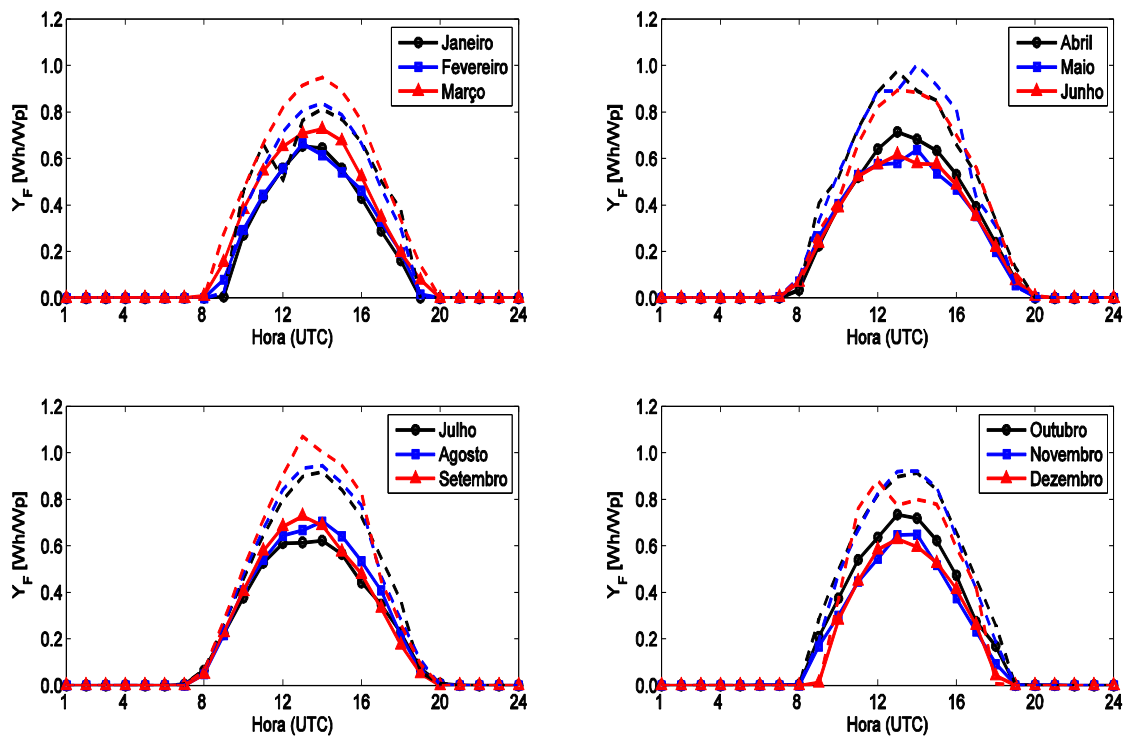


Figura 4.6 – Y_F horário médio mensal para a estação do Observatório.

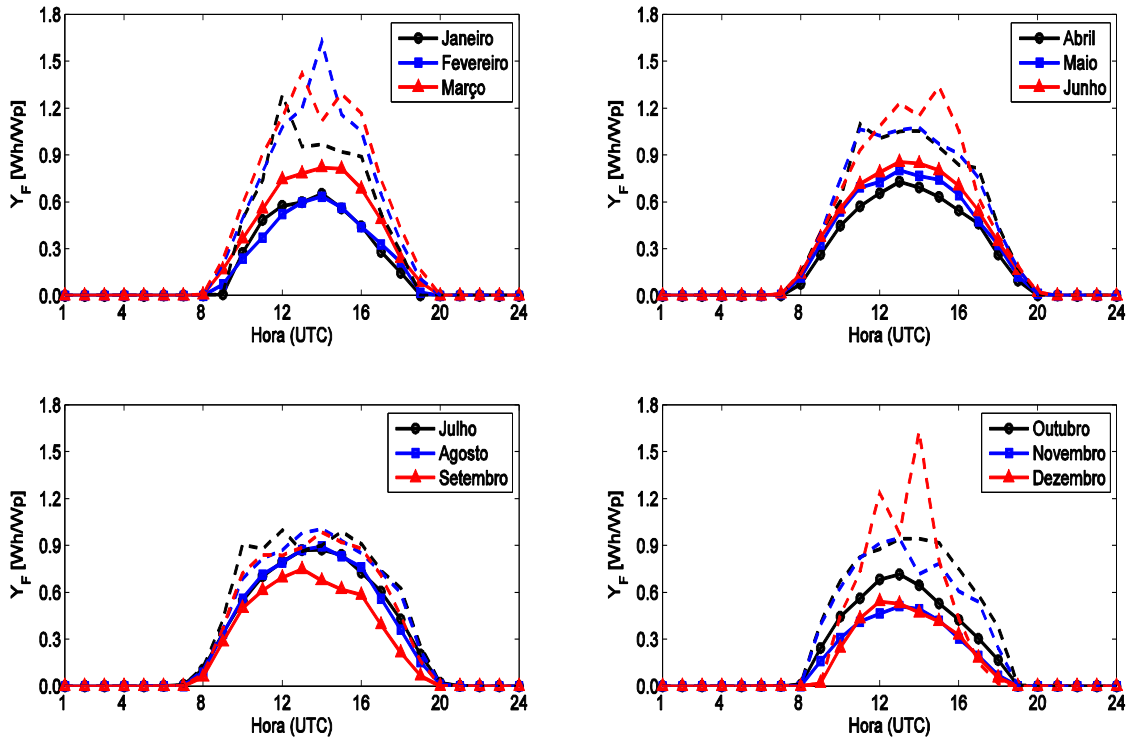


Figura 4.7 – Y_F horário médio mensal para a estação do Areiro.

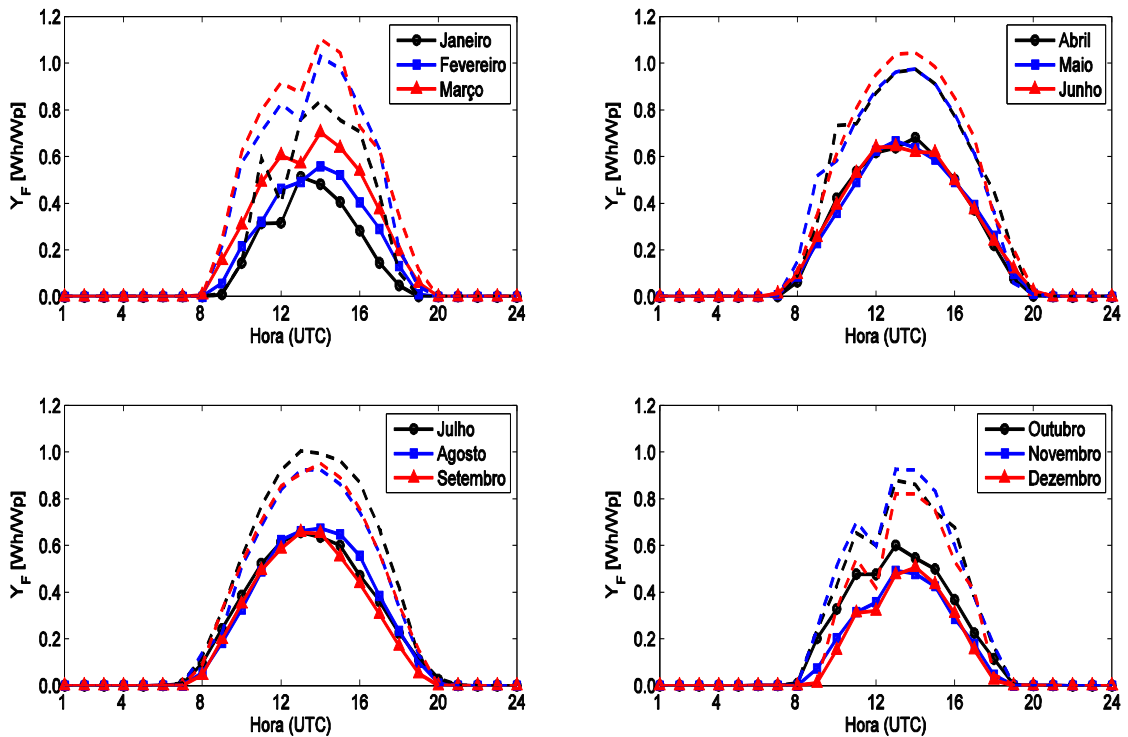


Figura 4.8 – Y_F horário médio mensal para a estação de São Jorge.

Na Figura 4.6, na Figura 4.7 e na Figura 4.8 os meses que possuem um valor mais elevado de Y_F horário médio são também aqueles que contêm o dia com maior produção de energia (por exemplo, o mês de Outubro, apresentado na Figura 4.6). Isto acontece devido à variação das condições meteorológicas de cada dia e de cada mês. Também é

possível observar que, embora Junho seja, tipicamente, um mês com altos índices de radiação solar, apresenta uma produção de energia inferior ao mês de Abril nas horas a meio do dia.

Segundo [52], o desempenho de uma central solar fotovoltaica pode ser caracterizado através do coeficiente de performance ou *PR* (*Performance Ratio*). A expressão para o cálculo do *PR* é dada por:

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (56)$$

com

$$Y_R = \frac{G_t}{G_r} \quad (57)$$

sendo Y_R o fator de referência, em horas, e G_t a radiação solar total incidente no módulo fotovoltaico, em Wh/m^2 .

Em termos anuais, foi obtido um *PR* de 91.1% para a estação do Observatório. Este valor é superior aos valores típicos das centrais fotovoltaicas convencionais. A razão para se ter obtido um *PR* tão elevado reside no facto de não se terem considerado as perdas de energia nos cabos e nas ligações das séries de módulos (*strings*) existentes em parques fotovoltaicos, uma vez que a simulação efetuada é apenas para um módulo e não para um conjunto de módulos. A variação anual do *PR* mensal para a estação do Observatório é apresentada na Figura 4.9. A variação anual do *PR* mensal para a estação do Areeiro é apresentada na Figura 4.10. A variação anual do *PR* mensal para a estação de São Jorge é apresentada na Figura 4.11.

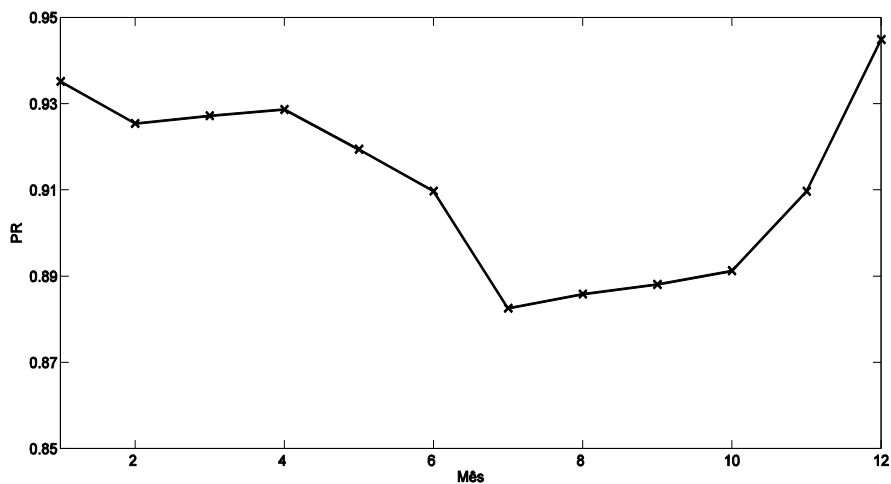


Figura 4.9 - Variação anual do *PR* mensal para a estação do Observatório.

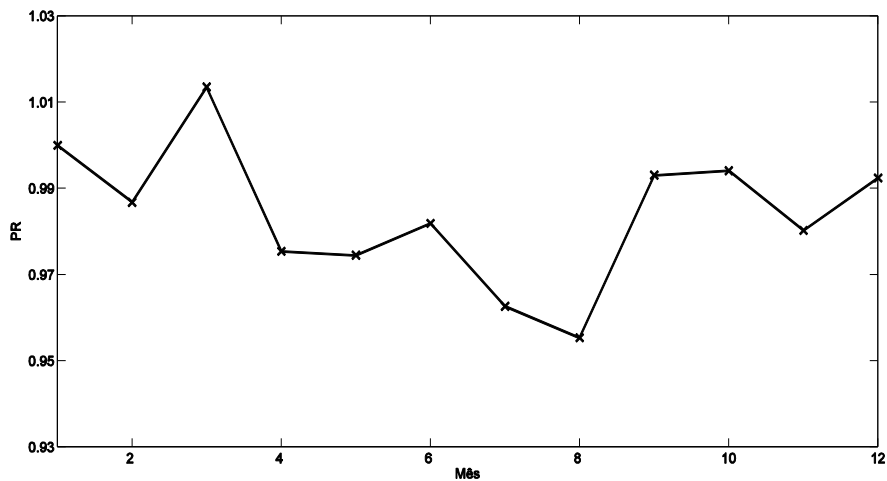


Figura 4.10 - Variação anual do PR mensal para a estação do Areeiro.

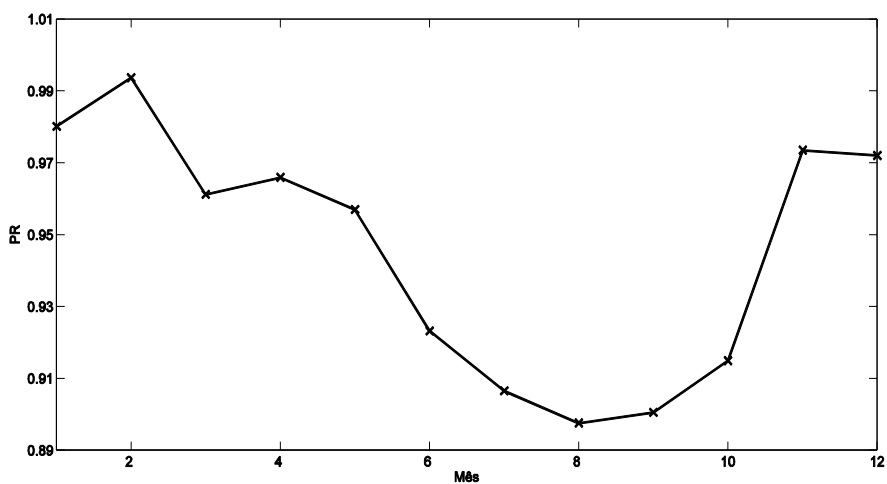


Figura 4.11 - Variação anual do PR mensal para a estação de São Jorge.

Na Figura 4.9, na Figura 4.10 e na Figura 4.11 o PR diminuí durante os meses de verão. Esta diminuição ocorre principalmente devido ao aumento da temperatura, o que faz com que a eficiência dos módulos diminua, embora a produção de energia seja maior. A estação com o valor de PR mais elevado é a estação do Areeiro e a estação com menor valor de PR é a estação de São Jorge.

4.3. Validação do Método Utilizado para a Radiação Difusa

Com o intuito de verificar a validade do método utilizado para a estimativa da radiação difusa na Seção 2.2.2, foi efetuada uma comparação entre o Y_F anual obtido utilizando as medições de radiação difusa da estação do Observatório e o Y_F anual obtido utilizando a radiação difusa gerada através da correlação de Liu e Jordan [58] para a mesma estação. Utilizando as medições reais de radiação difusa, foi obtido um Y_F anual de 1672.1 horas. Utilizando a radiação difusa gerada, foi obtido um Y_F anual de 1622.0 horas. Isto representa um desvio de 3.0% entre os Y_F anuais, o que permite concluir que a correlação de Liu e Jordan [58] é um método viável para a geração de radiação difusa, no que diz respeito ao objetivo deste trabalho.

Capítulo 5 - Distribuição Espacial da Radiação Solar e da Produção de Energia

Neste capítulo é apresentada uma interpolação espacial para toda a ilha da radiação solar global total anual incidente e do número de horas de sol equivalente à potência de pico. É também feita uma validação desta interpolação recorrendo a dados reais da produção de energia de três centrais fotovoltaicas instaladas na ilha.

5.1. Radiação Solar Global Total Anual

Tendo em vista a melhor compreensão da distribuição da radiação solar na ilha da Madeira, foi calculada a radiação solar global total anual do AMT, incidente numa superfície horizontal localizada em cada estação (H_T). Uma vez que os dados disponíveis são referentes apenas às estações meteorológicas e não a toda a ilha, foi feita uma interpolação por meio de funções híbridas polinomiais, através do ArcGIS Pro, para estimar a radiação solar global total anual na ilha. Foi utilizada a ferramenta *spline*, tipo tensão, com um peso de 0.1 e um número de pontos igual a 12. A distribuição espacial da radiação solar global total anual na ilha da Madeira é apresentada na Figura 5.1.

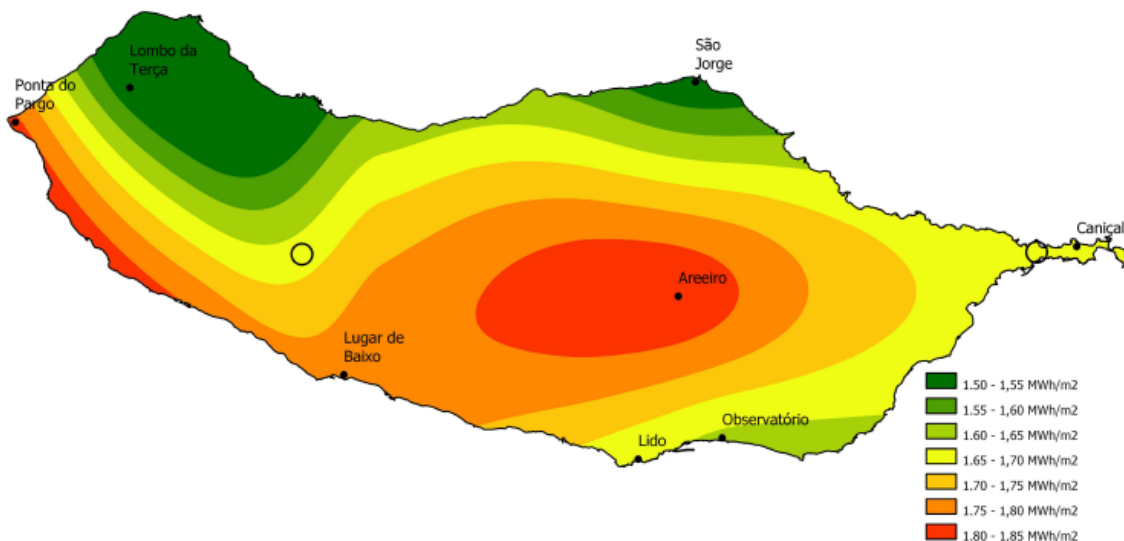


Figura 5.1 – Distribuição espacial da radiação solar global total anual na ilha da Madeira.

Na Figura 5.1, a distribuição da radiação solar global obtida é semelhante à distribuição apresentada em [55]. Embora o método e a amostra de dados utilizados em [55] seja diferente, uma vez que foram utilizados apenas dados compreendidos entre 2002 e 2005, e imagens de satélite para o mesmo período, é possível observar valores mais

elevados de radiação solar global no centro montanhoso da ilha e na encosta sul, e valores inferiores na encosta norte. Em [55] são apresentados valores de radiação solar global superiores a oeste da estação do Areeiro e a norte da estação do Lugar de Baixo, em relação aos índices apresentados na Figura 5.1. Dado que não foram calculados os AMT para locais que cobrissem melhor a zona central da ilha, principalmente porque o número de anos não era suficiente, a representação da distribuição da radiação nessa região não corresponde certamente à realidade, sendo necessário numa fase posterior melhorar a cobertura dessa região. A determinação do AMT para um maior número de locais na ilha da Madeira permitiria reduzir consideravelmente o erro da interpolação efetuada na determinação da Figura 5.1.

5.2. Número de Horas Equivalentes à Potência de Pico

Tendo como objetivo a determinação do potencial de produção de energia elétrica de origem fotovoltaica da ilha da Madeira, foi feita uma interpolação do Y_F ao longo da ilha, de forma semelhante à interpolação efetuada no cálculo da radiação solar global total anual. Os dados usados na elaboração desta figura são apresentados na Tabela 4.1. A distribuição espacial do fator de produção, Y_F , na ilha da Madeira é apresentado na Figura 5.2.

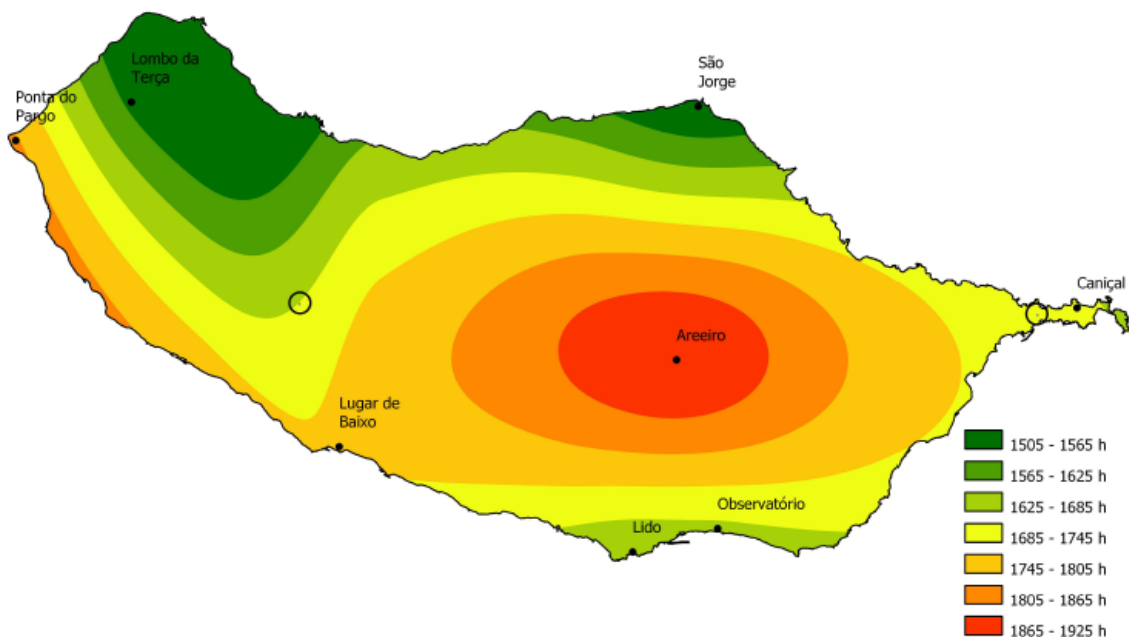


Figura 5.2 – Distribuição espacial do fator de produção, Y_F , na ilha da Madeira.

Na Figura 5.2, tal como nos níveis de radiação solar global, o fator Y_F é mais elevado no centro e na encosta sul da ilha, e inferior na encosta norte. Do ponto de vista da produção de energia elétrica através de um sistema fotovoltaico, a consulta da Figura 5.2 é preferível relativamente ao que é apresentado na Figura 5.1, porque no cálculo do fator Y_F estão incorporadas as eficiências do módulo fotovoltaico e do inversor, bem

como o efeito da temperatura ambiente e da intensidade média do vento. A determinação do fator Y_F para mais locais da ilha da Madeira permitiria reduzir consideravelmente a margem de erro da interpolação efetuada na elaboração da Figura 5.2, em particular na região central da ilha.

Utilizando os dados gentilmente cedidos pela EEM – Empresa de Eletricidade da Madeira, foi possível comparar o fator Y_F obtido através da interpolação com o fator Y_F para o ano de 2014 de três centrais fotovoltaicas existentes na região. A comparação da radiação solar total anual, H_T , e do fator Y_F para os anos de 2014 e AMT é apresentada na Tabela 5.1. Na Figura 5.1 e na Figura 5.2, as centrais fotovoltaicas existentes na ilha estão representadas por um círculo. As centrais A e B estão localizadas próximo do centro da ilha, a oeste da estação do Areeiro, enquanto a central C está localizada perto da estação do Caniçal.

Tabela 5.1 - Comparação da radiação solar total anual, H_T , e do fator Y_F para os anos de 2014 e AMT.

Central	H_T 2014 [MWh/m²]	H_T AMT [MWh/m²]	Desvio H_T [%]	Y_F real 2014 [h]	Y_F AMT [h]	Desvio Y_F [%]
Central A	1.680	1.676	0.24	1790.7	1686.4	5.82
Central B	1.680	1.676	0.24	1701.4	1686.4	1.00
Central C	1.637	1.665	-1.71	1612.0	1708.1	-5.96

Na Tabela 5.1 o H_T nas centrais A e B foi superior no ano de 2014 em comparação com o AMT. Na central C ocorreu o oposto, o H_T é inferior no ano de 2014 em comparação com o AMT. Os desvios entre os valores totais de radiação, H_T , de 2014 e do AMT estão abaixo dos 2%. No que diz respeito ao fator Y_F é observada a mesma tendência em relação aos desvios obtidos para a radiação total anual. Os desvios entre os fatores Y_F de 2014 e do AMT são ligeiramente superiores quando comparados com os desvios da radiação total anual para as mesmas centrais. Isto ocorre porque o fator Y_F não depende apenas da radiação solar incidente.

Capítulo 6 - Conclusões

Neste trabalho foi realizada uma avaliação do recurso solar na ilha da Madeira e uma estimativa da produção de energia elétrica de origem fotovoltaica em diferentes locais, considerando os vários fatores ambientais e as características dos módulos fotovoltaicos. Numa primeira parte do trabalho foram construídos dois anos meteorológicos de referência, o Ano Médio e o Ano Meteorológico Típico, com o objetivo de detetar os padrões climatológicos da ilha, em particular da radiação solar disponível. Para o efeito foram utilizados os valores de oito estações meteorológicas do Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Foi possível concluir que o ano médio representa adequadamente os fenómenos climatológicos de longo prazo (escala sinóptica) e que o ano meteorológico típico representa adequadamente os fenómenos climatológicos de curto prazo, tais como as variações de temperatura na escala horária ou a passagem de nuvens por exemplo, preservando as variações de longo prazo, na escala mensal. O ano médio foi construído calculando a média horária de toda a amostra de dados sem preenchimento das lacunas de dados. O ano meteorológico típico foi calculado utilizando o método de Sandia e recorrendo a um algoritmo elaborado em linguagem de programação Matlab. Foi também realizada uma filtragem e um preenchimento das lacunas nas séries de dados e uma correção das medições da radiação difusa devido à banda de sombreamento. Uma vez que apenas existiam medições de radiação difusa na estação do Observatório, foram gerados dados desta grandeza meteorológica para as restantes estações com o auxílio da correlação existente na literatura, tendo sido verificado que o seu impacto na estimativa da produção anual de energia, o qual se concluiu ser pequeno.

Numa segunda fase foi construído um modelo em Matlab com capacidade de simular o funcionamento de uma célula/módulo fotovoltaico através das suas características elétricas bem como da radiação solar incidente, da temperatura ambiente e da intensidade do vento. Este modelo foi validado recorrendo às curvas I-V fornecidas por diversos fabricantes de módulos fotovoltaicos, tendo sido obtido um desvio de potência máximo de cerca de 3%. Foi também analisado o número de horas de produção à potência de pico (Y_F) e a performance dos módulos numa base mensal e anual (PR). É possível concluir que o Y_F está em torno de um valor médio de 1690 horas para toda a ilha, para o módulo fotovoltaico considerado, ocorrendo o valor máximo na estação do Areeiro, no centro da ilha. Foram igualmente observados valores de Y_F superiores na encosta sul comparativamente à encosta norte. Foi verificada uma diminuição do valor do PR durante os meses de verão, essencialmente devido ao aumento da temperatura ambiente, não tendo sido consideradas as perdas nas ligações das séries de módulos (*strings*) e nas ligações entre módulos.

A terceira fase deste trabalho consistiu na estimativa da radiação solar global total anual e do número de horas equivalentes à potência de pico em todo o território da ilha da

Madeira. Esta estimativa foi realizada com recurso a interpolação espacial usando o ArcGIS Pro. Os padrões descritos no mapa da radiação solar total global anual são os mesmos descritos no mapa do fator Y_F , contudo, no mapa do fator Y_F é possível observar a influência da temperatura na produção de energia elétrica de origem fotovoltaica. A diferença entre os valores do fator Y_F estimados com base no AMT e os valores do fator Y_F para o ano de 2014 com base em valores reais de três centrais fotovoltaicas (valores cedidos pela Empresa de Eletricidade da Madeira) é de 5.82%, 1.00% e -5.96%, o que, tendo em conta que a diferença entre a radiação solar global total anual, H_T , do ano de 2014 e do AMT é cerca de 0.24%, 0.24% e -1.71%, respetivamente, valida o método construído para estimar o fator Y_F para a ilha da Madeira e demonstra a utilidade do estudo apresentado nesta dissertação.

6.1 Lista de Publicações

Quando se adota um tema de investigação original cujos trabalhos têm como objetivo não só contribuir para o desenvolvimento científico e tecnológico da área escolhida, mas também a obtenção de um grau académico pós-graduado, como é o caso desta dissertação, é fundamental, à medida que as tarefas previamente planeadas vão sendo cumpridas, que os resultados sejam publicados periodicamente de modo que a comunidade científica, seja incentivada à discussão e à troca de ideias, tendo como finalidade o avanço científico e tecnológico.

Seguidamente, são apresentadas as secções com o relatório técnico e comunicações científicas em atas de conferências realizadas no âmbito das contribuições desta dissertação. As duas últimas secções são ordenadas cronologicamente pela data de publicação.

Relatório Técnico para o Instituto Português do Mar e da Atmosfera

[1] Abreu, Edgar F.M., Canhoto, P., Melício, R., “Tratamento de dados associados com a radiação solar fornecidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Madeira,” Departamento de Física, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, janeiro de 2016.

Comunicação Científica em Ata de Conferência

[1] Abreu, Edgar F.M., Canhoto, P., Pior, Victor M.M., Melício, R., “Determination of a mean solar radiation year and of a typical meteorological year for the region of Funchal in the Madeira Island,” em 9ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Madrid, Spain, 2016. Aceite.

Referências

- [1] L. Araújo e M. J. Coelho, “Políticas públicas de energia e ambiente: rumo a um país sustentável?,” *Sociologia, Problemas e Práticas*, vol. 72, 2013.
- [2] Empresa de Eletricidade da Madeira, “Caracterização da Rede de Transporte e Distribuição em AT e MT,” 2015.
- [3] R. Melício, Modelos dinâmicos de sistemas de conversão de energia eólica ligados à rede eléctrica, Universidade da Beira Interior, 2010.
- [4] A. Cotar, A. Filcic e D. Jardas, “Photovoltaic Systems,” REA Kvarner d.o.o., Rijeka, 2012.
- [5] M. Obi e R. Bass, “Trends and challenges of grid-connected photovoltaic systems - A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 1082-1094, 2016.
- [6] M. David, L. Adelard, P. Lauret e F. Garde, “A method to generate Typical Meteorological Years from raw hourly climatic databases,” *Building and Environment*, vol. 45, pp. 1722-1732, 2010.
- [7] A. Chan, “Generation of typical meteorological years using genetic algorithm for different energy systems,” *Renewable Energy*, vol. 90, pp. 1-13, 2016.
- [8] I. Hall, R. Prairie, H. Anderson e E. Boes, “Generation of a Typical Meteorological Year for 26 SOLMET stations,” *Sandia Laboratories Report SAND 78-1601*, 1978.
- [9] I. García e J. Torres, “Assessment of the adequacy of EN ISO 15927-4 reference years for photovoltaic systems,” *PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS*, 2015.
- [10] R. Fagbenle, “Generation of a Test Reference Year for Ibadan, Nigeria,” *Energy Convers. Mgmt*, vol. 36, pp. 61-63, 1995.
- [11] T. Kalamees e J. Kurnitski, “Estonian test reference year for energy calculations,” *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, vol. 12, pp. 40-58, 2006.
- [12] I. Rahman e J. Dewsbury, “Selection of typical weather data (test reference years) for Subang, Malaysia,” *Building and Environment*, vol. 42, pp. 3636-3641, 2007.
- [13] K. Lee, H. Yoo e G. Levermore, “Generation of typical weather data using the ISO Test Reference Year (TRY) method for major cities of South Korea,” *Building and Environment*, vol. 45, pp. 956-963, 2010.
- [14] H. Lund, “The Design Reference Year Users Manual,” *Thermal Insulation Laboratory, Report No. 274*, 1995.

- [15] R. Festa e C. Ratto, "Proposal of a numerical procedure to select reference years," *Solar Energy*, vol. 50, pp. 9-17, 1993.
- [16] L. Crow, "Weather year for energy calculations," *ASHRAE*, vol. 26, pp. 42-47, 1984.
- [17] A. d. Miguel e J. Bilbao, "Test reference year generation from meteorological and simulated solar radiation data," *Solar Energy*, vol. 78, pp. 695-703, 2005.
- [18] M. Gazela e E. Mathioulakis, "A new method for typical weather data selection to evaluate long-term performance of solar energy systems," *Solar Energy*, vol. 70, pp. 339-348, 2001.
- [19] H. Yang, Y. Li, L. Lu e R. Qi, "First order multivariate Markov chain model for generating annual weather data for Hong Kong," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 2371-2377, 2011.
- [20] K. Skeiker, "Comparison of methodologies for TMY generation using 10 years data for Damascus, Syria," *Energy Conversion and Management*, vol. 48, pp. 2090-2102, 2007.
- [21] S. Janjai e P. Deeyai, "Comparison of methods for generating typical meteorological year using meteorological data from a tropical environment," *Applied Energy*, vol. 86, pp. 528-537, 2009.
- [22] A. Ebrahimpour e M. Maerefat, "A method for generation of typical meteorological year," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 410-417, 2010.
- [23] D. Pissimanis, G. Karras, V. Notaridou e K. Gavra, "The generation of a "typical meteorological year" for the city of Athens," *Solar Energy*, vol. 40, pp. 405-411, 1988.
- [24] S. Kalogirou, "Generation of typical meteorological year (TMY-2) for Nicosia, Cyprus," *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 2317-2334, 2003.
- [25] K. Skeiker, "Generation of a typical meteorological year for Damascus zone using the Filkenstein-Schafer statistical method," *Energy Conversion and Management*, vol. 45, pp. 99-112, 2004.
- [26] N. Sawaqed, Y. Zurigat e H. Al-Hinai, "A step-by-step application of Sandia method in developing typical meteorological years for different locations in Oman," *Int. J. Energy Res.*, vol. 29, pp. 723-737, 2005.
- [27] A. Chan, T. Chow, S. Fong e J. Lin, "Generation of a typical meteorological year for Hong Kong," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, pp. 87-96, 2006.
- [28] Y. Jiang, "Generation of typical meteorological year for different climates of China," *Energy*, vol. 35, pp. 1946-1953, 2010.

- [29] S. Pusat, I. Ekmekçi e M. Akkoyunlu, “Generation of typical meteorological year for different climates of Turkey,” *Renewable Energy*, vol. 75, pp. 144-151, 2015.
- [30] J. Finkelstein e R. Schafer, “Improved goodness-of-fit tests,” *Biometrika*, vol. 58, pp. 641-645, 1971.
- [31] S. Wilcox e W. Marion, “Users Manual for TMY3 Data Sets,” *National Renewable Energy Laboratory*, pp. 11-20, 2008.
- [32] H. Bulut, “Typical solar radiation year for southeastern Anatolia,” *Renewable Energy*, vol. 29, pp. 1477-1488, 2004.
- [33] Z. Jin, W. Yezheng e Y. Gang, “Generation of typical solar radiation year for China,” *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 1972-1985, 2006.
- [34] H. Zang, Q. Xu e H. Bian, “Generation of typical solar radiation data for different climates of China,” *Energy*, vol. 38, pp. 236-248, 2012.
- [35] R. Castro, *Uma Introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltaico e Mini-hídrica*, Lisboa: IST Press, 2011.
- [36] A. Humada, M. Hojabri, S. Mekhilef e H. Hamada, “Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 494-509, 2016.
- [37] M. El-Adawi e I. Al-Nuaim, “A method to determine the solar cell series resistance from a single I-V. Characteristic curve considering its shunt resistance - new approach,” *Vacuum*, vol. 64, pp. 33-36, 2002.
- [38] S. Browden e A. Rohatgi, “Rapid and accurate determination of series resistance and fill factor losses in industrial silicon solar cells,” 2001.
- [39] C. Zhang, J. Zhang, Y. Hao, Z. Lin e C. Zhu, “A simple and efficient solar cell parameter extraction method from a single current-voltage curve,” *Journal of Applied Physics*, vol. 110, 2011.
- [40] A. Celik e N. Acikgoz, “Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models,” *Applied Energy*, vol. 84, pp. 1-15, 2007.
- [41] V. Lo Brano, A. Orioli, G. Ciulla e A. Di Gangi, “An improved five-parameter model for photovoltaic modules,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 94, pp. 1358-1370, 2010.
- [42] E. Rodrigues, R. Melício, V. Mendes e J. Catalão, “Simulation of a Solar Cell considering Single-Diode Equivalent Circuit Model,” em *ICREPO*, Las Palmas, 2011.
- [43] D. Rekioua e E. Matagne, *Optimization of Photovoltaic Power Systems*, Londres: Springer-Verlag London Limited, 2012.

- [44] J. Patel e G. Sharma, “Modeling and Simulation of Solar Photovoltaic Module Using Matlab/Simulink,” *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 02, nº 03, 2013.
- [45] L. Fialho, R. Melício e V. Mendes, “PV System Modeling by Five Parameters and in Situ Test,” em *Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, Electrical drives and Motion - SPEEDAM 2014*, Ischia, Itália, 2014.
- [46] D. Lukac, M. Stosovic, D. Milovanovic e V. Litovski, “Reference Analysis of the Analogous Models for Photovoltaic Cells by Comparison with the Real Photovoltaic Modules,” em *X International Symposium on Industrial Electronics - INDEL 2014*, Banja Luka, 2014.
- [47] C. Schwingshackl, M. Petitta, J. Wagner, G. Belluardo, D. Moser, M. Castelli, M. Zebisch e A. Tetzlaff, “Wind effect on PV module temperature: Analysis of different techniques for an accurate estimation,” *Energy Procedia*, vol. 40, pp. 77-86, 2013.
- [48] E. Skoplaki, A. Boudouvis e J. Palyvos, “A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 92, pp. 1393-1402, 2008.
- [49] M. Koehl, M. Heck, S. Wiesmeier e J. Wirth, “Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 95, pp. 1638-1646, 2011.
- [50] M. Mattei, G. Notton, C. Cristofari, M. Muselli e P. Poggi, “Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance,” *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 553-567, 2006.
- [51] S. Kurtz, K. Whitfield, D. Miller, J. Joyce, J. Wohlgemuth e M. Kempe, “Evaluation of high-temperature exposure of rack-mounted photovoltaic modules,” em *34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2009.
- [52] B. Marion, J. Adelstein, K. Boyle, H. Hayden, B. Hammond, T. Fletcher, B. Canada, D. Narang, D. Shugar, H. Wenger, A. Kimber, L. Mitchell, G. Rich e T. Townsend, “Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems,” em *31st IEEE Photovoltaics Specialists*, Lake Buena Vista, Florida, 2005.
- [53] “Trends 2015 in Photovoltaic Applications,” IEA-PVPS, 2015.
- [54] Direção Geral de Energia e Geologia, “Estatísticas Rápidas - nº 133,” 2015.
- [55] M. Vázquez, P. Belmonte, J. Navarro, M. Cerqueira e J. Esteves, “Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira,” Laboratório Regional de Engenharia Civil, 2008.
- [56] C. Long e E. Dutton, “BSRN Global Network recommended QC tests,” BSRN Technical Report, 2002.

- [57] L. McArthur, Baseline Surface Radiation Network, Ontario: World Climate Research Programme, 2005.
- [58] M. Iqbal, An Introduction to Solar Radiation, Academic Press, 1983.
- [59] S. Kalogirou, Solar energy engineering: processes and systems, Academic Press, 2009.
- [60] Instituto Português do Mar e da Atmosfera, “www.ipma.pt,” [Online]. [Acedido em 14 Janeiro 2016].
- [61] I. Sousa, Procedimentos na construção do TRY e implicações na simulação higrotérmica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.
- [62] R. Lopes, Efeito do Sombreamento nos Painéis Fotovoltaicos, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.
- [63] D. King, J. Kratochvil e W. Boyson, “Temperature Coefficients por PV Modules and Arrays: Measurement Methods, Difficulties and Results,” *26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1997.
- [64] Edgar F.M. Abreu, P. Canhoto e R. Melício, “Tratamento de dados associados com a radiação solar fornecidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Madeira,” Évora, 2016.
- [65] Edgar F.M. Abreu, P. Canhoto, V.M.M. Prior e R. Melício, “Determination of a Mean Solar Radiation Year and of a Typical Meteorological Year for the region of Funchal in the Madeira Island,” em *9ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofisica*, Madrid, Spain, 2016.

Anexos

Do trabalho efetuado nesta dissertação para a determinação do ano médio e do AMT, resultou uma base de dados constituída por: ano médio para todas as grandezas meteorológicas de todas as estações analisadas; comparação de CDF para todos os meses, todas as grandezas meteorológicas e todas as estações analisadas; comparação entre a média de longo prazo e o AMT para todas as grandezas meteorológicas de todas as estações analisadas; AMT para todas as estações analisadas. Esta base de dados foi enviada em anexo, juntamente com [64]. Nesta secção são apresentados alguns desses dados. No Anexo I é apresentado o ano médio de radiação solar global para as estações do Caniçal, Lido, Lugar de Baixo, Lombo da Terça, Ponta do Pargo. No Anexo II é apresentada a radiação solar global do AMT para as estações do Caniçal, Lido, Lugar de Baixo, Lombo da Terça e Ponta do Pargo. No Anexo III é apresentada uma comparação entre as médias mensais de toda a amostra de dados e as médias mensais dos AMT para as estações do Caniçal, Lido, Lugar de Baixo, Lombo da Terça e Ponta do Pargo.

Anexo I – Ano médio

I.1 – Radiação solar global numa superfície horizontal

Neste anexo é apresentado o ano médio de radiação solar global para as estações do Caniçal, Lido, Lugar de Baixo, Lombo da Terça e Ponta do Pargo. O ano médio de radiação solar global, na estação do Caniçal, é apresentado na Figura I.1. O ano médio de radiação solar global, na estação do Lido, é apresentado na Figura I.2. O ano médio de radiação solar global, na estação do Lugar de Baixo, é apresentado na Figura I.3. O ano médio de radiação solar global, na estação do Lombo da Terça, é apresentado na Figura I.4. O ano médio de radiação solar global, na estação da Ponta do Pargo, é apresentado na Figura I.5.

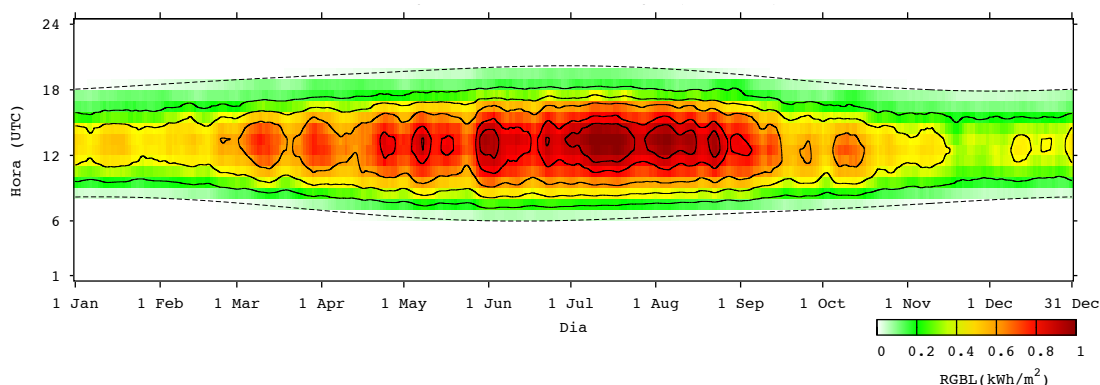


Figura I.1 - Ano médio de radiação solar global na estação do Caniçal.

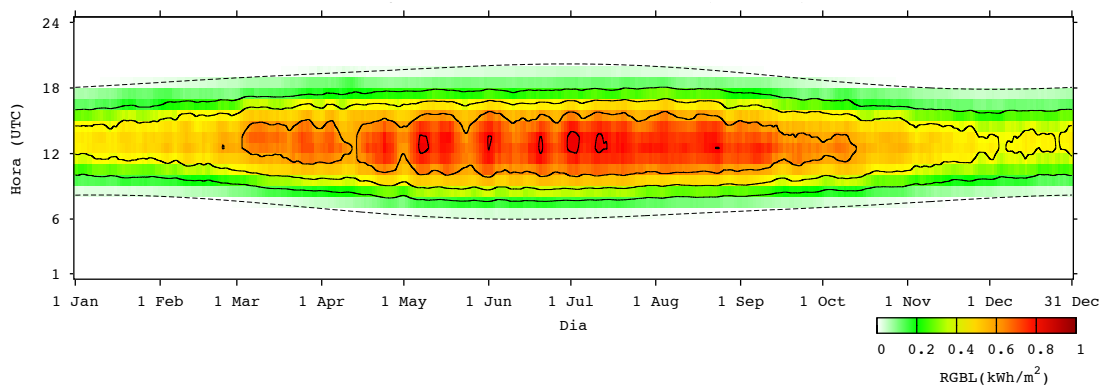


Figura I.2 - Ano médio de radiação solar global na estação do Lido.

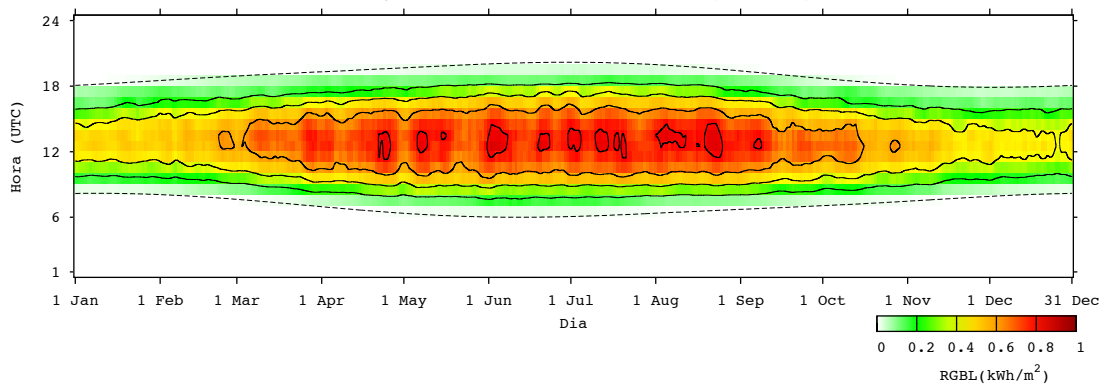


Figura I.3 - Ano médio de radiação solar global na estação do Lugar de Baixo.

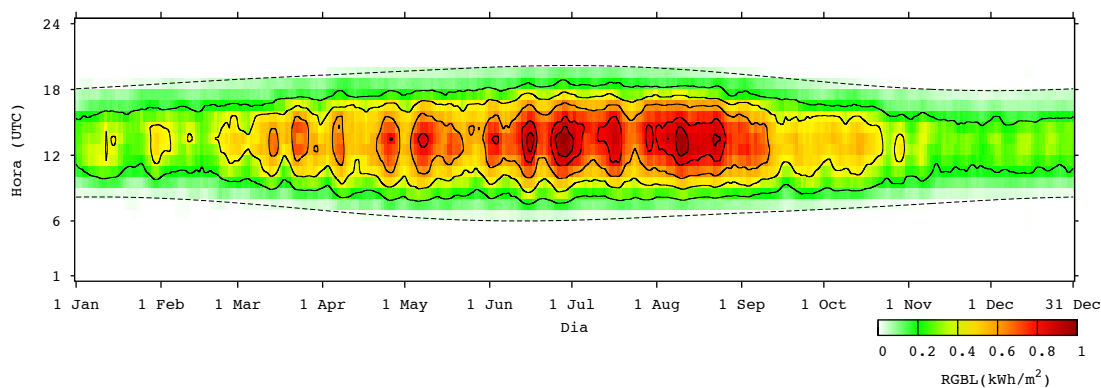


Figura I.4 - Ano médio de radiação solar global na estação do Lombo da Terça.

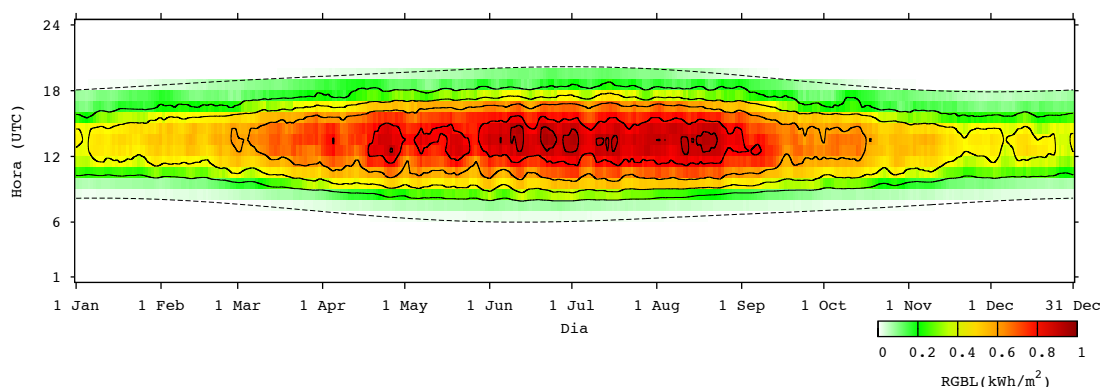


Figura I.5 - Ano médio de radiação solar global na estação da Ponta do Pargo.

I.2 – Temperatura média do ar

Neste anexo é apresentado o ano médio de temperatura média do ar para as estações do Observatório, Areeiro, São Jorge, Caniçal, Lido, Lugar de Baixo, Lombo da Terça e Ponta do Pargo. O ano médio de temperatura média do ar, na estação do Observatório, é apresentado na Figura I.6. O ano médio de temperatura média do ar, na estação do Areeiro, é apresentado na Figura I.7. O ano médio de temperatura média do ar, na estação de São Jorge, é apresentado na Figura I.8. O ano médio de temperatura média do ar, na estação do Caniçal, é apresentado na Figura I.9. O ano médio de temperatura média do ar, na estação do Lido, é apresentado na Figura I.10. O ano médio de temperatura média do ar, na estação do Lugar de Baixo, é apresentado na Figura I.11. O ano médio de temperatura média do ar, na estação do Lombo da Terça, é apresentado na Figura I.12. O ano médio de temperatura média do ar, na estação da Ponta do Pargo, é apresentado na Figura I.13.

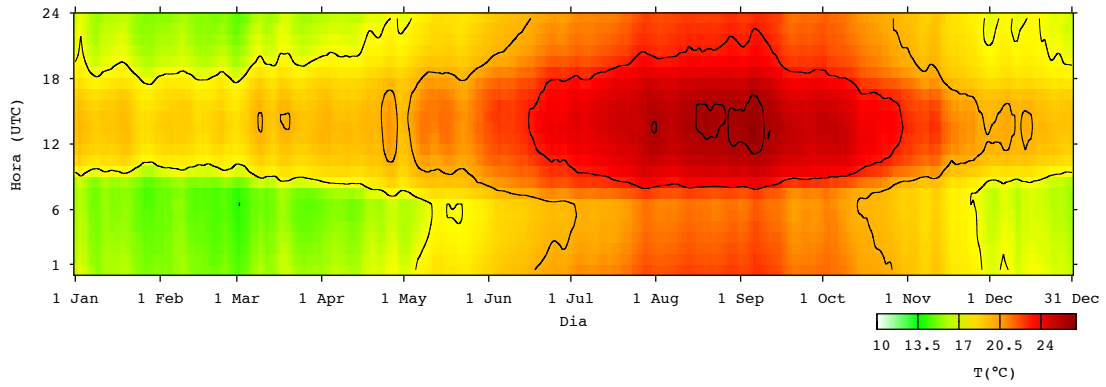


Figura I.6 - Ano médio de temperatura média do ar na estação do Observatório.

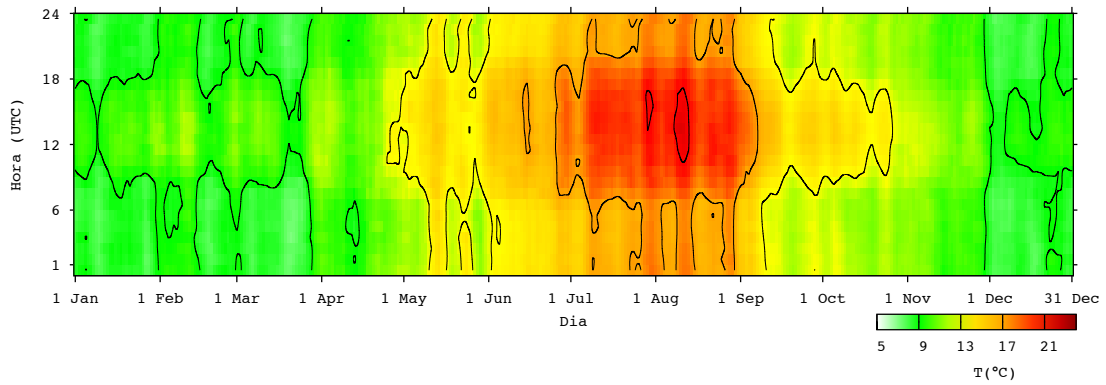


Figura I.7 - Ano médio de temperatura média do ar na estação do Areeiro.

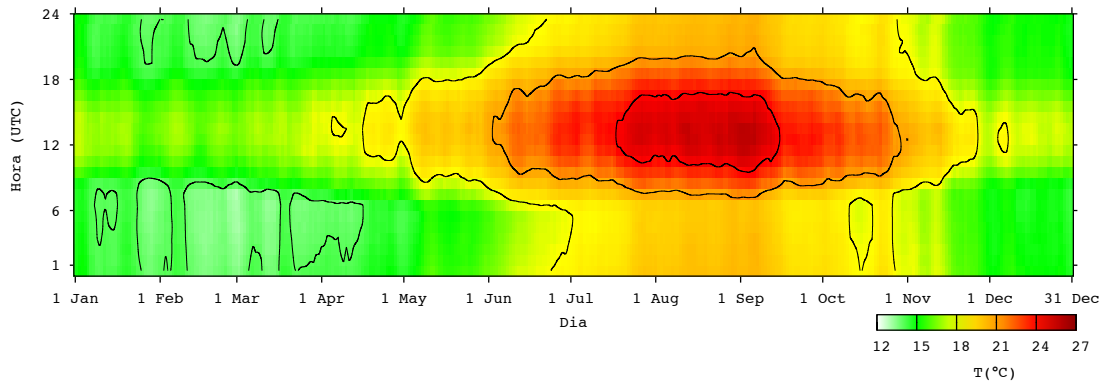


Figura I.8 - Ano médio de temperatura média do ar na estação de São Jorge.

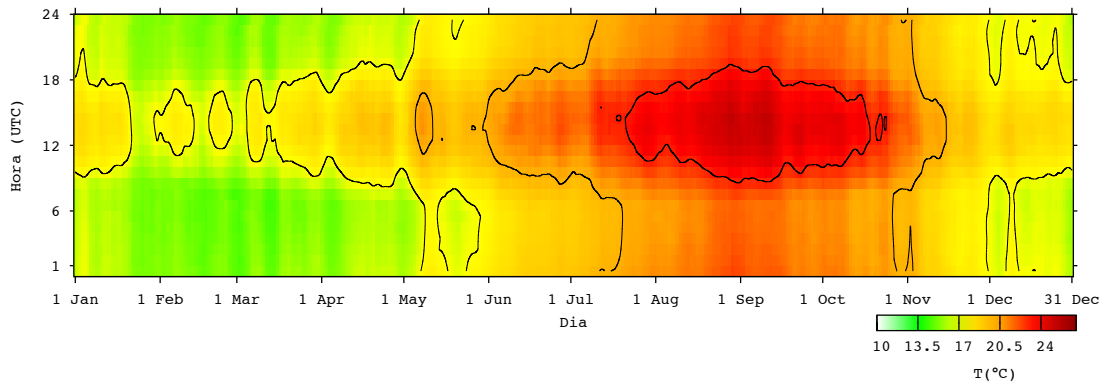


Figura I.9 - Ano médio de temperatura média do ar na estação do Caniçal.

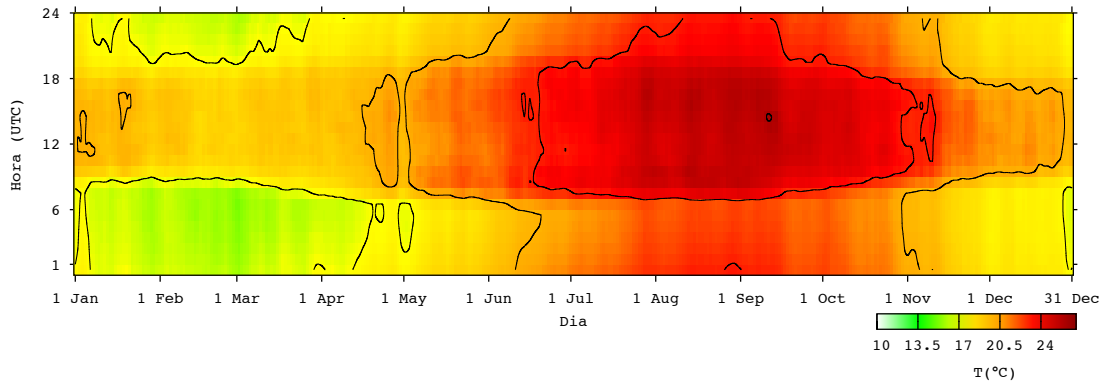


Figura I.10 - Ano médio de temperatura média do ar na estação do Lido.

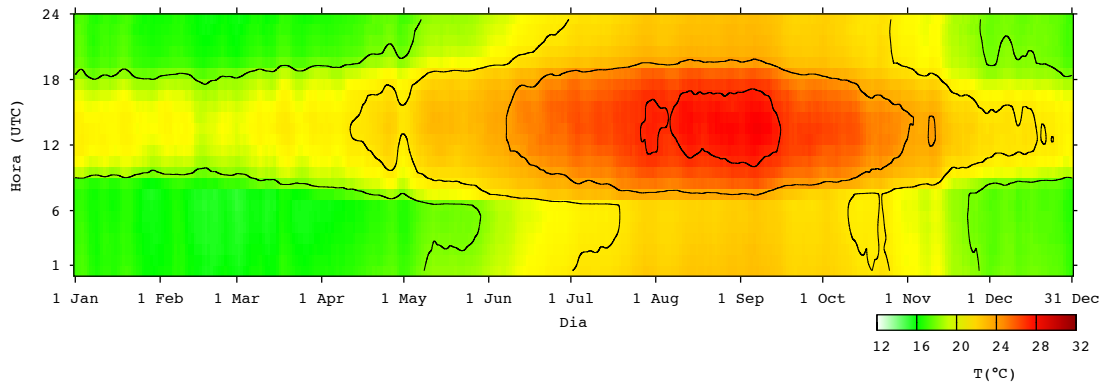


Figura I.11 - Ano médio de temperatura do ar na estação do Lugar de Baixo.

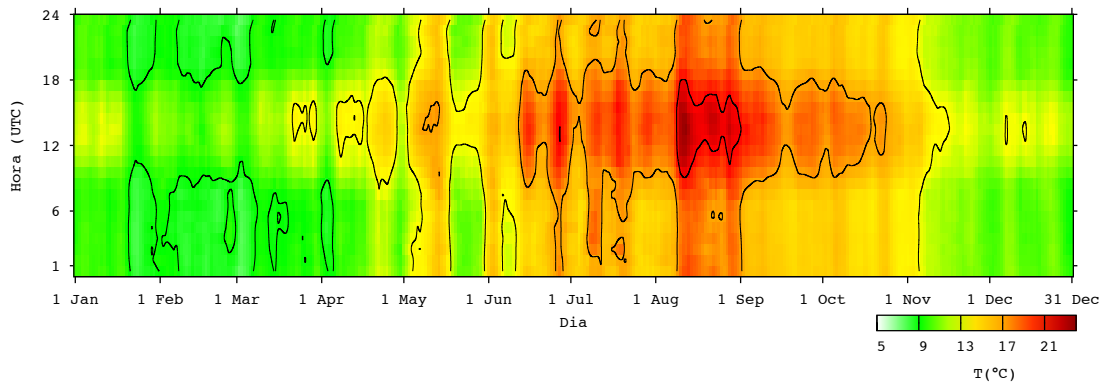


Figura I.12 - Ano médio de temperatura média do ar na estação do Lombo da Terça.

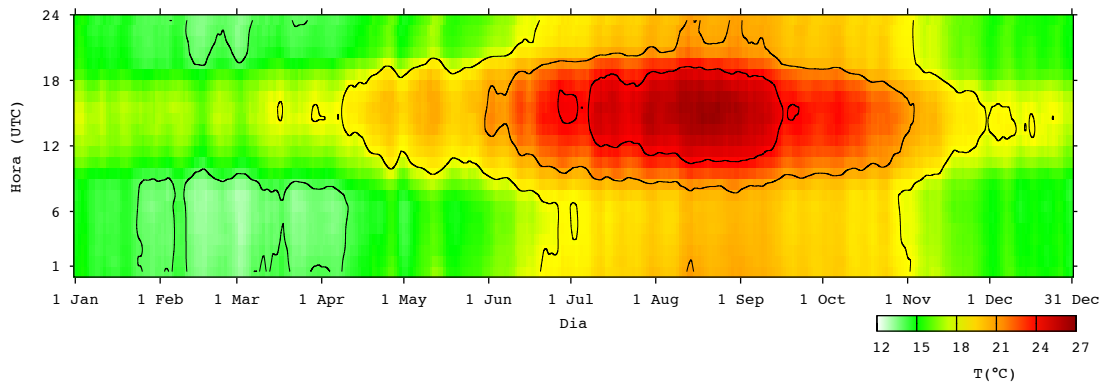


Figura I.13 - Ano médio de temperatura média do ar na estação da Ponta do Pargo.

I.3 – Intensidade média do vento

Neste anexo é apresentado o ano médio de intensidade média do vento para as estações do Observatório, Areeiro, São Jorge, Caniçal, Lido, Lugar de Baixo, Lombo da Terça e Ponta do Pargo. O ano médio de intensidade média do vento, na estação do Observatório, é apresentado na Figura I.14. O ano médio de intensidade média do vento, na estação do Areeiro, é apresentado na Figura I.15. O ano médio de intensidade média do vento, na estação de São Jorge, é apresentado na Figura I.16. O ano médio de intensidade média do vento, na estação do Caniçal, é apresentado na Figura I.17. O ano médio de intensidade média do vento, na estação do Lido, é apresentado na Figura I.18. O ano médio de intensidade média do vento, na estação do Lugar de Baixo, é apresentado na Figura I.19. O ano médio de intensidade média do vento, na estação do Lombo da Terça, é apresentado na Figura I.20. O ano médio de intensidade média do vento, na estação da Ponta do Pargo, é apresentado na Figura I.21.

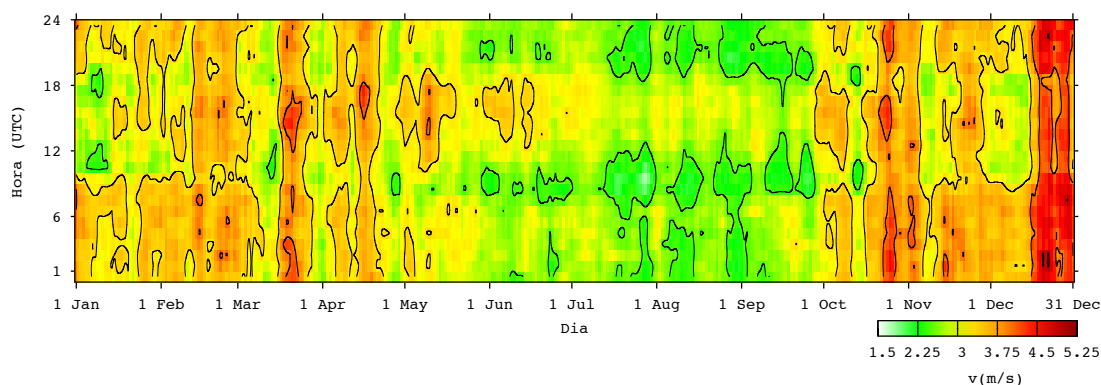


Figura I.14 - Ano médio de intensidade média do vento na estação do Observatório.

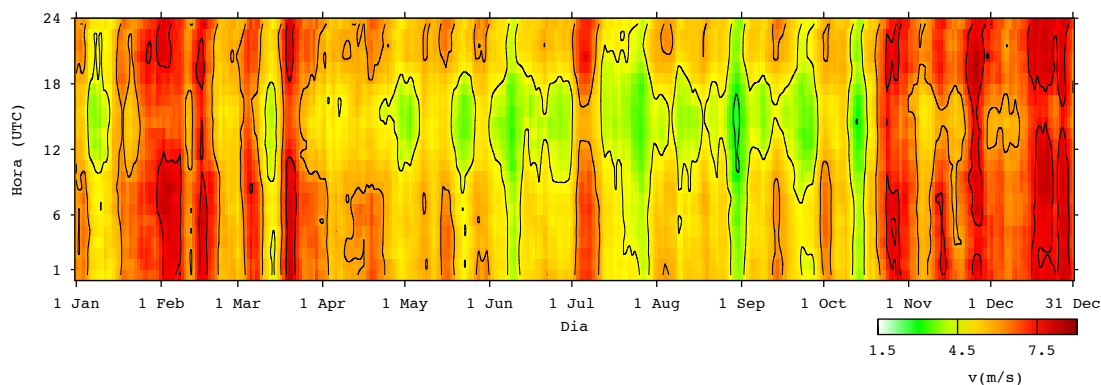


Figura I.15 - Ano médio de intensidade média do vento na estação do Areeiro.

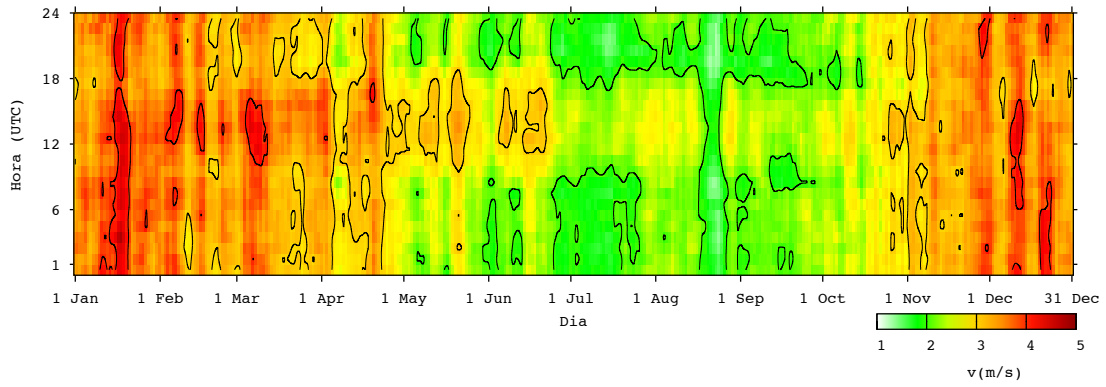


Figura I.16 - Ano médio de intensidade média do vento na estação de São Jorge.

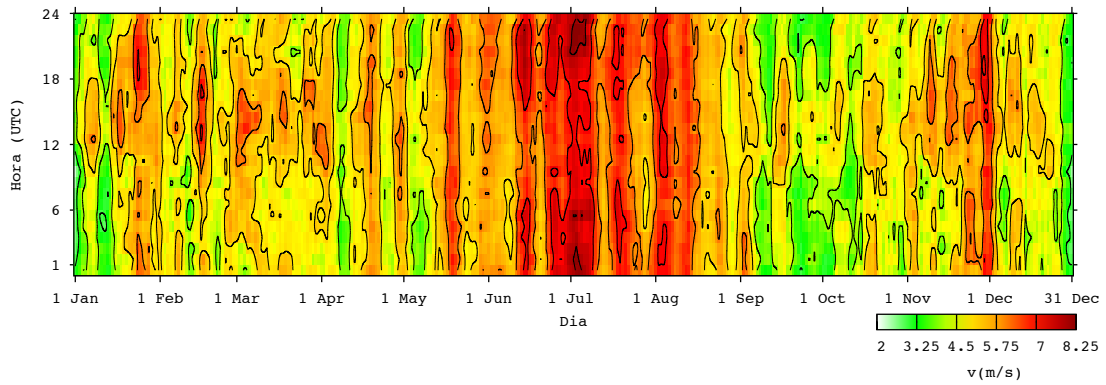


Figura I.17 - Ano médio de intensidade média do vento na estação do Caniçal.

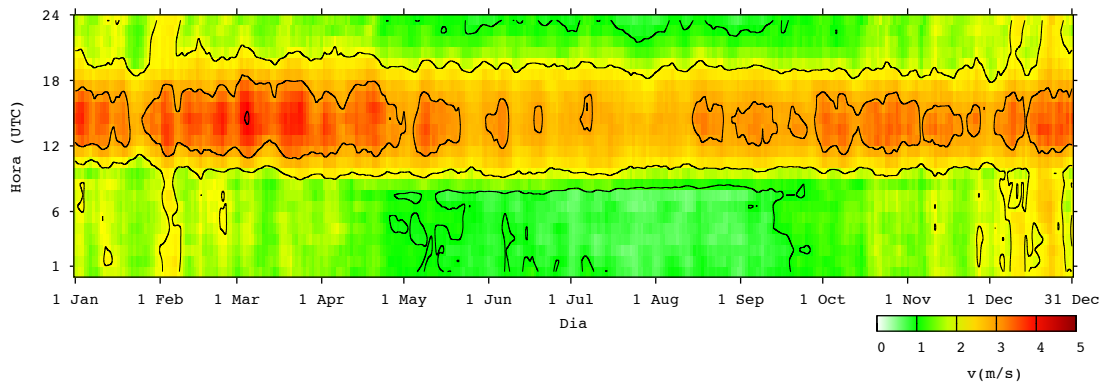


Figura I.18 - Ano médio de intensidade média do vento na estação do Lido.

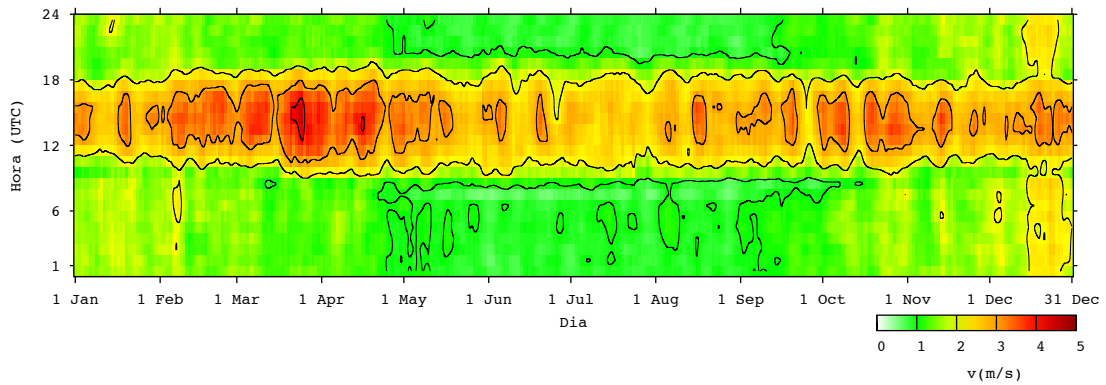


Figura I.19 - Ano médio de intensidade média do vento na estação do Lugar de Baixo.

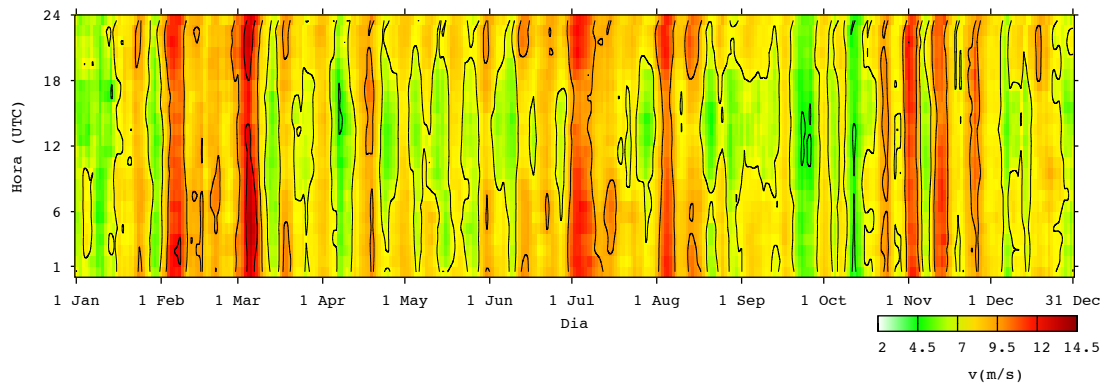


Figura I.20 - Ano médio de intensidade média do vento na estação do Lombo da Terça.

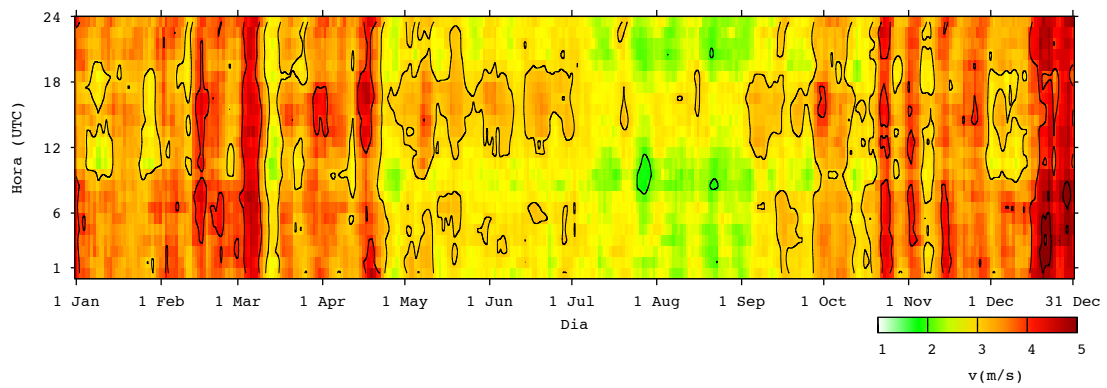


Figura I.21 - Ano médio de intensidade média do vento na estação da Ponta do Pargo.

Anexo II – Ano Meteorológico Típico

Neste anexo é apresentada a radiação solar global do AMT para as estações do Caniçal, Lido, Lugar de Baixo, Lombo da Terça e Ponta do Pargo. A radiação solar global do AMT, na estação do Caniçal, é apresentada na Figura II.1. A radiação solar global do AMT, na estação do Lido, é apresentada na Figura II.2. A radiação solar global do AMT, na estação do Lugar de Baixo, é apresentada na Figura II.3. A radiação solar global do AMT, na estação do Lombo da Terça, é apresentada na Figura II.4. A radiação solar global do AMT, na estação da Ponta do Pargo, é apresentada na Figura II.5.

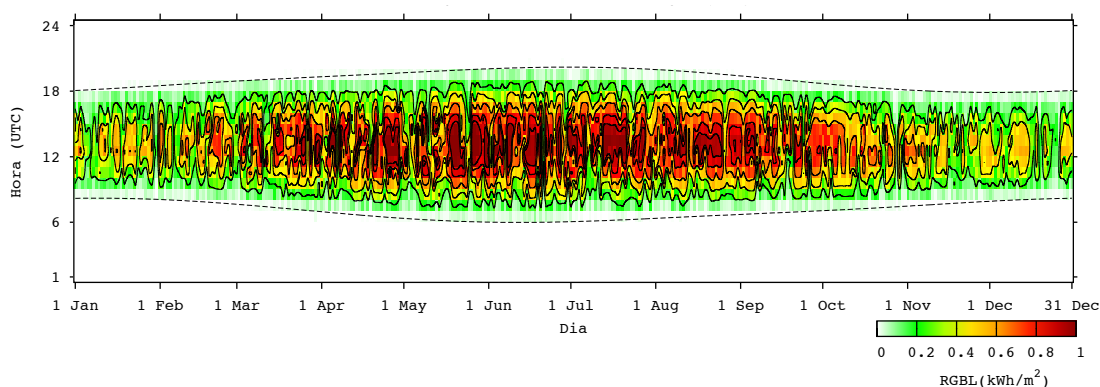


Figura II.1 – Radiação solar global do AMT na estação do Caniçal.

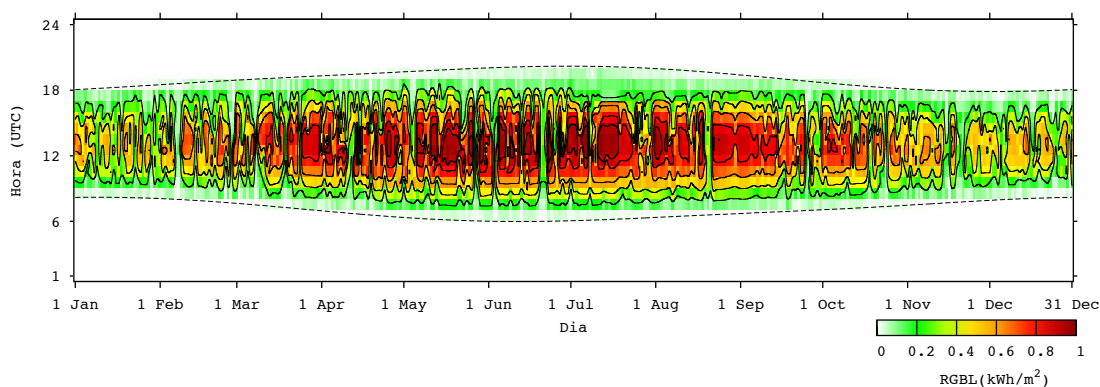


Figura II.2 - Radiação solar global do AMT na estação do Lido.

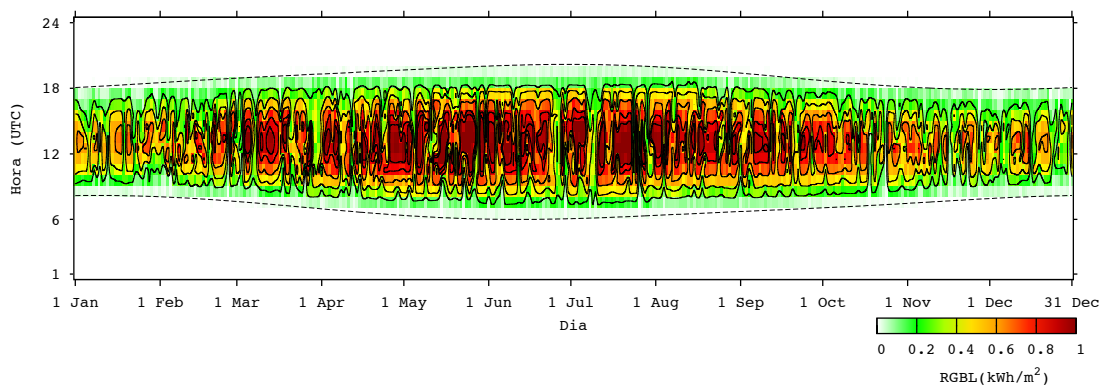


Figura II.3 - Radiação solar global do AMT na estação do Lugar de Baixo.

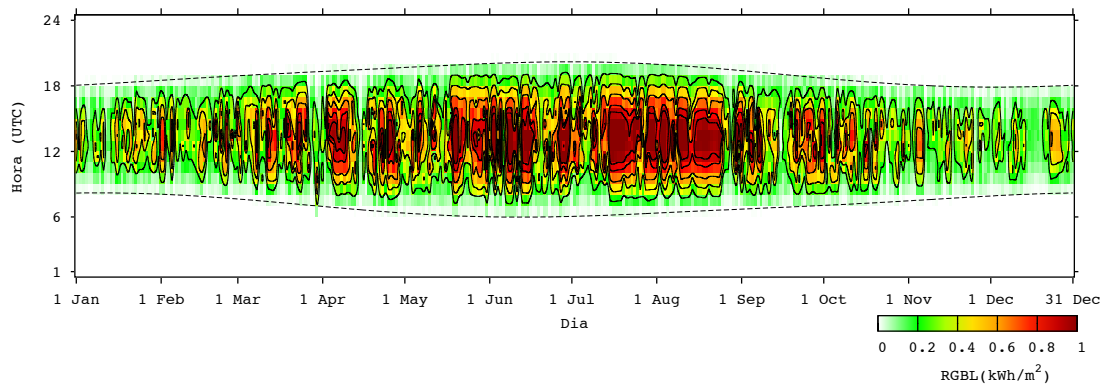


Figura II.4 - Radiação solar global do AMT na estação do Lombo da Terça.

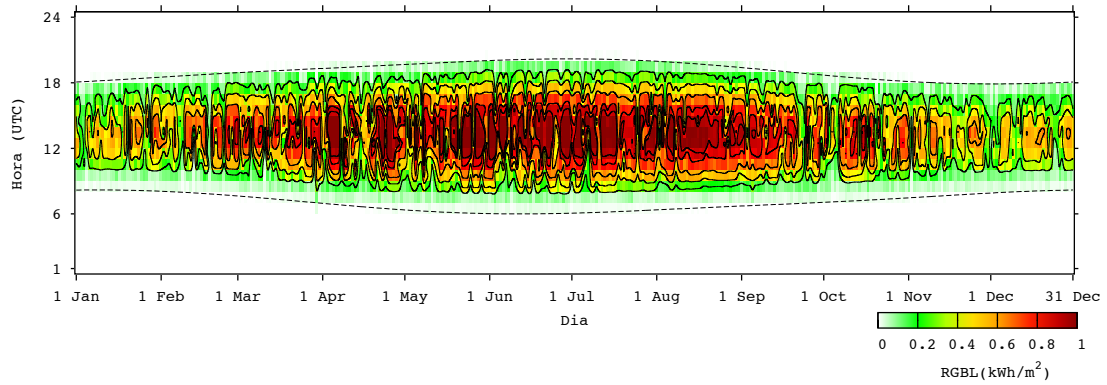


Figura II.5 - Radiação solar global do AMT na estação da Ponta do Pargo.

Anexo III – Validação do Ano Meteorológico Típico

Neste anexo é apresentada uma comparação entre as médias mensais de toda a amostra de dados e as médias mensais dos anos escolhidos para o AMT para todas as estações meteorológicas analisadas. A comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT para a temperatura média do ar e intensidade média do vento, na estação do Observatório, é apresentada na Figura III.1 e na Figura III.2, respetivamente. A comparação entre as médias de longo prazo e AMT para a temperatura média do ar e intensidade média do vento, na estação de São Jorge, é apresentada na Figura III.3 e na Figura III.4, respetivamente. A comparação entre as médias de longo prazo e AMT para a temperatura média do ar e intensidade média do vento, na estação do Areeiro, é apresentada na Figura III.5 e na Figura III.6, respetivamente. A comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da radiação solar global, temperatura média do ar e intensidade média do vento, na estação do Caniçal, é apresentada na Figura III.7, na Figura III.8 e na Figura III.9, respetivamente. A comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da radiação solar global, temperatura média do ar e intensidade média do vento, na estação do Lido, é apresentada na Figura III.10, na Figura III.11 e na Figura III.12. A comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da radiação solar global, temperatura média do ar e intensidade média do vento, na estação do Lugar de Baixo, é apresentada na Figura III.13, na Figura III.14 e na Figura III.15, respetivamente. A comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da radiação solar global, temperatura média do ar e intensidade média do vento, na estação do Lombo da Terça, é apresentada na Figura III.16, na Figura III.17 e na Figura III.18, respetivamente. A comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da radiação solar global, temperatura média do ar e intensidade média do vento na estação da Ponta do Pargo, é apresentada na Figura III.19, na Figura III.20 e na Figura III.21, respetivamente. A comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da humidade relativa média do ar, na estação do Observatório, é apresentada na Figura III.22, como exemplo da validação desta grandeza.

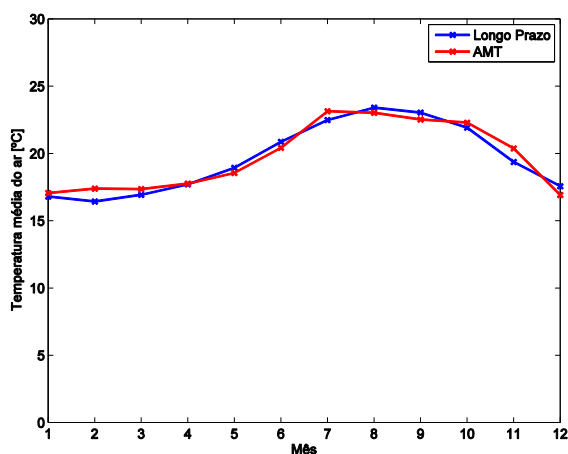


Figura III.1 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da temperatura média do ar na estação do Observatório.

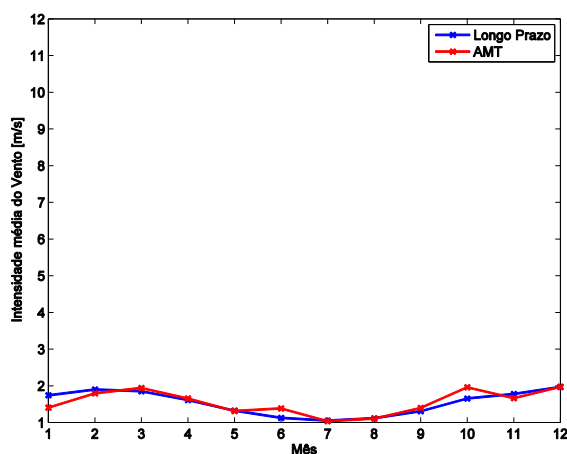


Figura III.2 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação do Observatório.

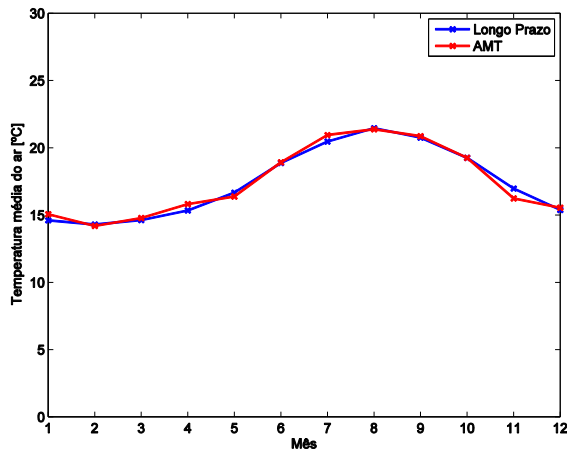


Figura III.3 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da temperatura média do ar na estação de São Jorge.

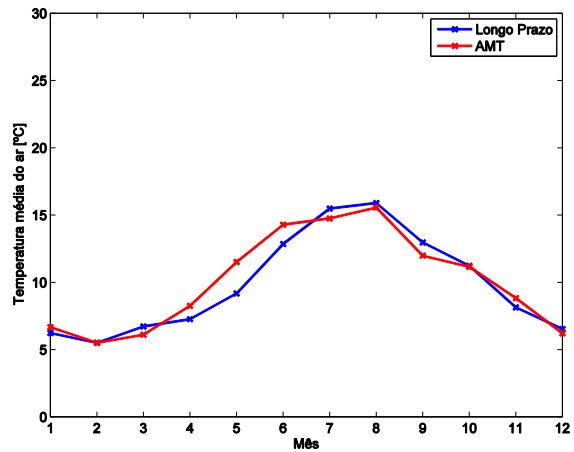


Figura III.4 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação de São Jorge.

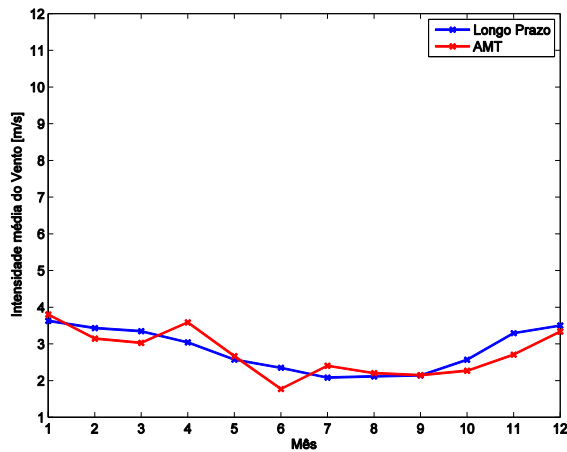


Figura III.5 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação de São Jorge.

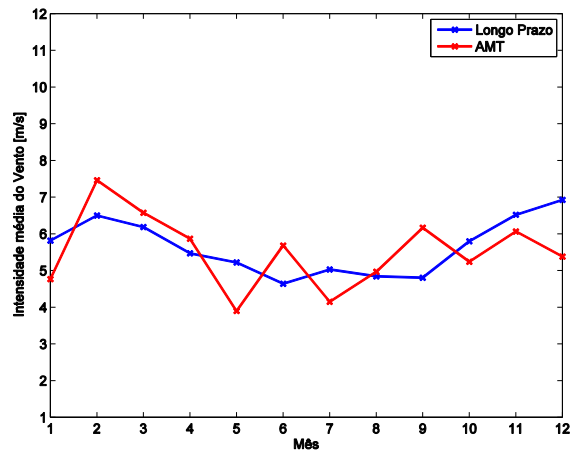


Figura III.6 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação do Areiro.

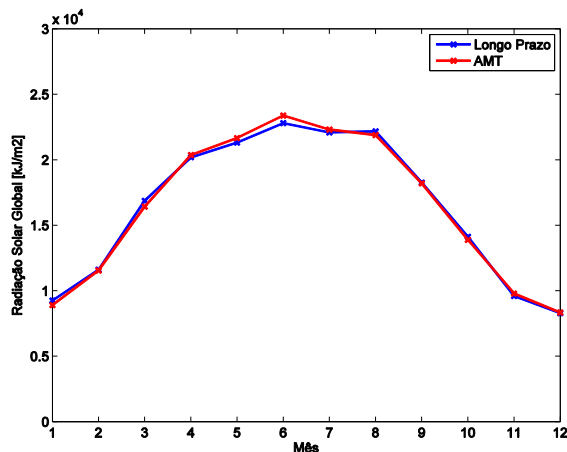


Figura III.7 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da radiação solar global na estação do Caniçal.

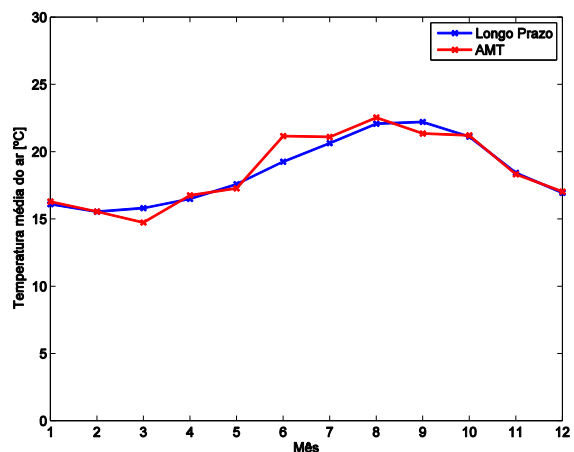


Figura III.8 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da temperatura média do ar na estação do Caniçal.

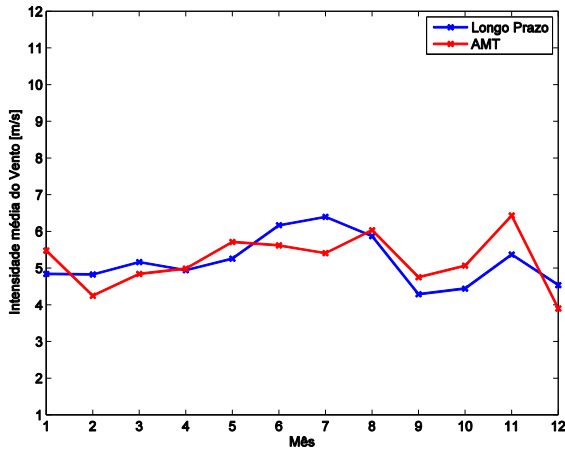


Figura III.9 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação do Caniçal.

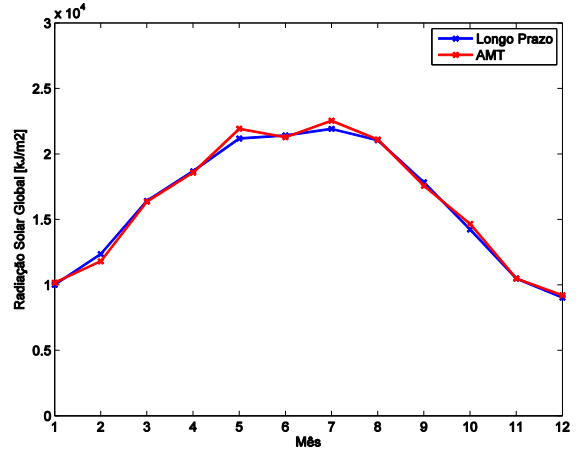


Figura III.10 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da radiação solar global na estação do Lido.

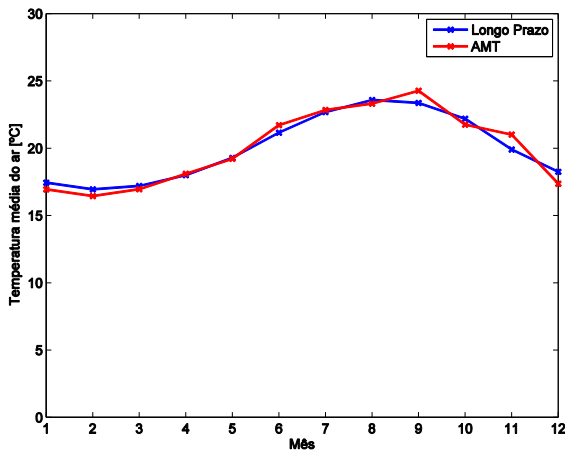


Figura III.11 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da temperatura média do ar na estação do Lido.

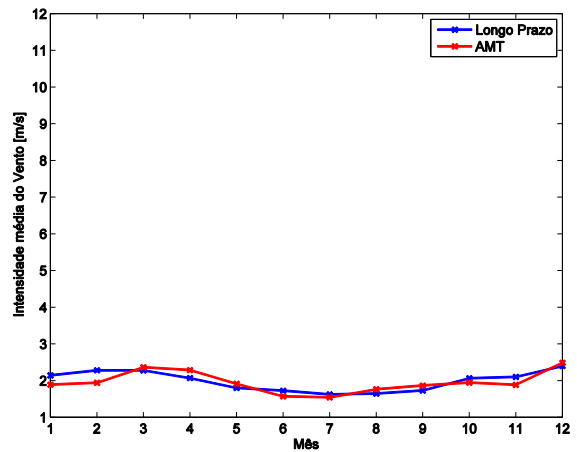


Figura III.12 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação do Lugar de Baixo.

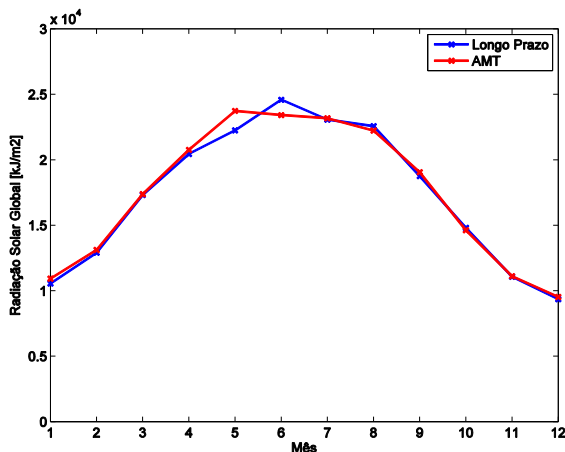


Figura III.13 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da radiação solar global na estação do Lugar de Baixo.

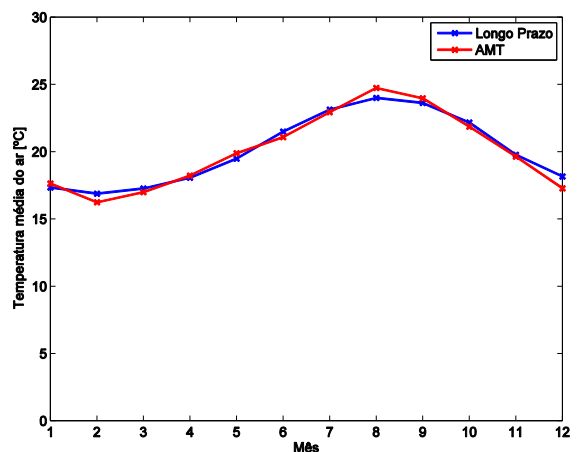


Figura III.14 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da temperatura média do ar na estação do Lugar de Baixo.

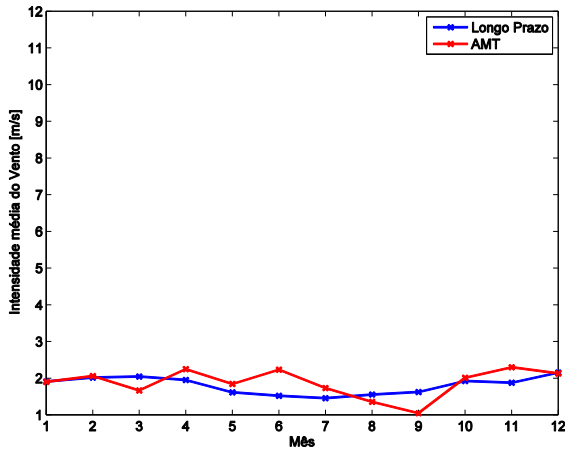


Figura III.15 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação do Lugar de Baixo.

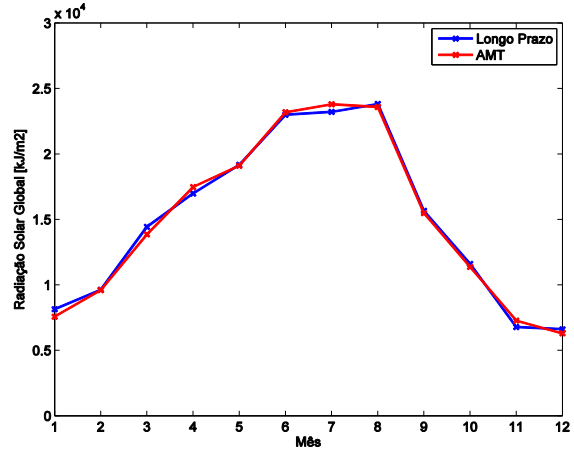


Figura III.16 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da radiação solar global na estação do Lombo da Terça.

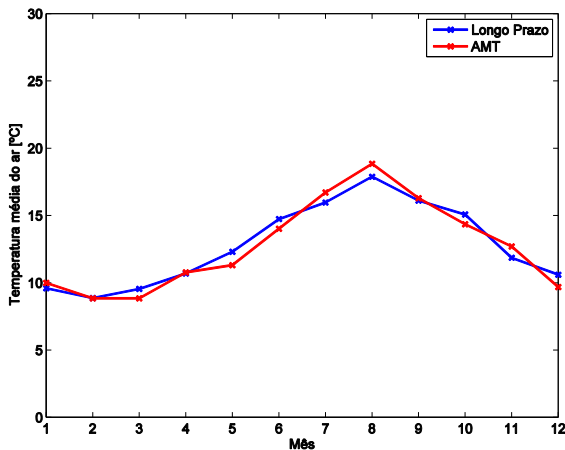


Figura III.17 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da temperatura média do ar na estação do Lombo da Terça.

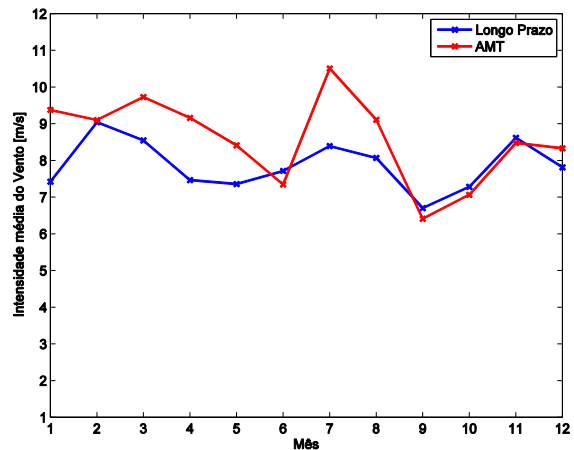


Figura III.18 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação do Lombo da Terça.

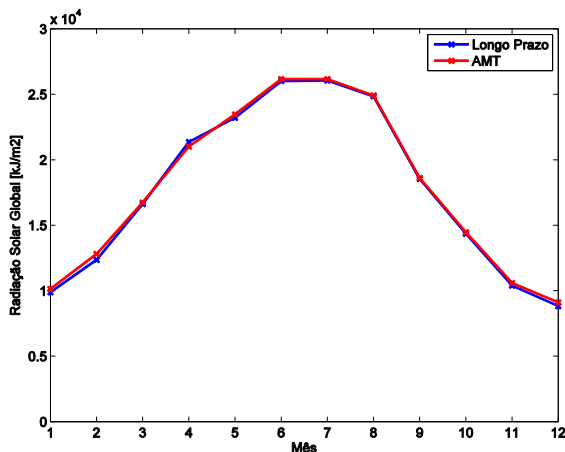


Figura III.19 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da radiação solar global na estação da Ponta do Pargo.

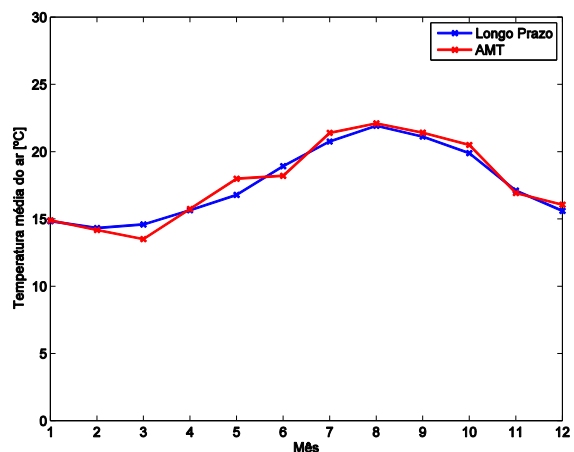


Figura III.20 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da temperatura média do ar na estação da Ponta do Pargo.

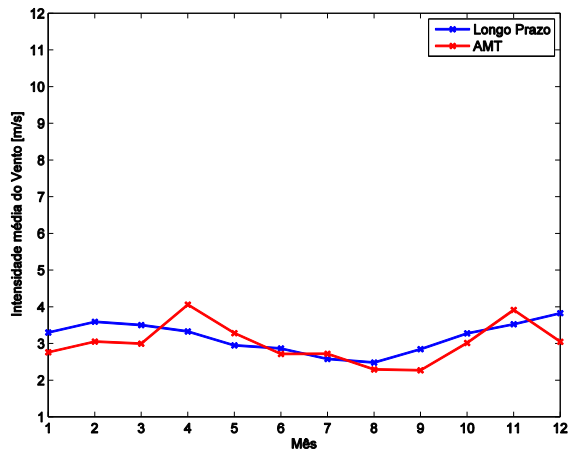


Figura III.21 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da intensidade média do vento na estação da Ponta do Pargo.

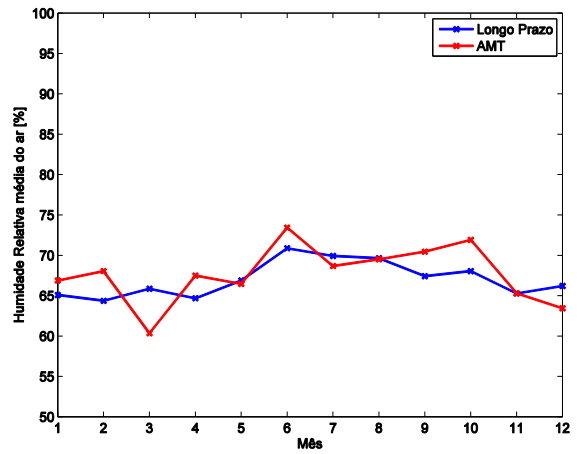


Figura III.22 - Comparação entre as médias mensais de longo prazo e AMT da humidade relativa média do ar na estação do Observatório.