



**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**

**ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**Tratamento de dados associados com a radiação solar  
fornecidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera,  
Madeira**

**Relatório Preliminar**

Edgar Abreu

**Orientação do Professor Paulo Canhoto e do Professor Rui Melício**

**Mestrado em Engenharia da Energia Solar**

**Estudo e Relatório Técnico para o Instituto Português do Mar e da  
Atmosfera, Madeira**

Évora, janeiro de 2016



## **Resumo**

Este relatório técnico tem como objetivo descrever o modo como os registos das amostras de dados, i.e., medições das grandezas meteorológicas fornecidas pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), ilha da Madeira, foram tratadas. Foram utilizados registos de oito estações meteorológicas distribuídas pela ilha.

No relatório técnico estão descritos os processos de filtragem das medições de radiação solar global e radiação solar difusa, de temperatura máxima e mínima do ar, a correção da radiação solar difusa, o preenchimento de lacunas nas medições e a dimensão da amostra de dados utilizada em cada estação.

Este relatório também descreve os métodos utilizados para preencher as lacunas nas séries de dados originais, bem como os métodos utilizados na construção do ano médio e do ano meteorológico típico. O ano meteorológico típico será posteriormente usado na simulação da produção de energia solar através de sistemas fotovoltaicos instalados na ilha da Madeira.



## Índice

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Filtragem, correção e validação dos dados .....</b>	<b>2</b>
2.1. Dimensão da amostra de dados utilizada.....	2
2.2. Filtragem da radiação solar global e correção da radiação solar difusa .....	2
2.3. Filtragem das temperaturas máxima e mínima do ar .....	3
2.4. Humidade Relativa e Velocidade média do Vento.....	3
<b>3. Preenchimento de Lacunas.....</b>	<b>3</b>
3.1. Radiação solar global.....	3
3.2. Radiação solar difusa .....	4
3.3. Temperatura do ar e Humidade Relativa média, máxima e mínima e Velocidade média do Vento .....	4
3.4. Cálculo de médias e extremos .....	7
<b>4. Determinação do Ano Médio.....</b>	<b>7</b>
<b>5. Determinação do Ano Meteorológico Típico .....</b>	<b>8</b>
<b>6. Resultados preliminares .....</b>	<b>8</b>
6.1. Ano médio.....	8
6.2. Ano Meteorológico Típico.....	10
<b>7. Conclusões e Trabalho Futuro .....</b>	<b>15</b>
<b>8. Referências bibliográficas.....</b>	<b>16</b>



## 1. Introdução

O conhecimento dos padrões climatológicos de uma região são determinantes para avaliar o seu potencial energético renovável. Assim, na ilha da Madeira, foram analisados registos horários de oito estações meteorológicas: Areeiro, Caniçal, Observatório, Lido, Lombo da Terça, Lugar de Baixo, Ponta do Pargo e São Jorge.

A dimensão da amostra de dados não é a mesma para todas as estações sendo apenas consideradas as estações que possuíam uma amostra de dados mínima de cinco anos de medições completos (ver Tabela 1). As grandezas meteorológicas analisadas foram a temperatura máxima, média e mínima do ar, a humidade relativa máxima, média e mínima do ar, a velocidade máxima e média do vento; a radiação solar global e a radiação solar difusa.

Este relatório técnico apresenta duas abordagens distintas ao tratamento de dados meteorológicos da ilha da Madeira, cujo objetivo é o de identificar e representar os padrões climatológicos na ilha da Madeira, para posterior utilização na simulação de sistemas de energias renováveis, em particular de energia solar. A primeira abordagem consistiu na elaboração de um ano médio das grandezas meteorológicas analisadas. Um ano médio é composto pela média horária de todas as medições de uma determinada grandeza. O ano médio é constituído por 8760 h, permitindo observar a variação das diferentes grandezas meteorológicas ao longo do ano, podendo assim identificar-se máximos, mínimos e tendências. Com o intuito de melhor captar esses padrões, foi feita também, para cada hora, uma média móvel centrada de cinco dias.

A segunda abordagem consistiu na elaboração de um ano meteorológico típico - AMT (*Typical Meteorological Year* - TMY, terminologia usada nos E.U.A ou *Test Reference Year* - TRY, terminologia usada na Europa).

Neste relatório técnico, o método usado para calcular o AMT foi o método de Sandia [1]. Este método consiste na identificação dos meses/anos cujas funções de distribuição acumulada (CDF) de valores diários melhor se ajustam à função de distribuição acumulada de valores diários considerando toda a amostra de dados de um determinado mês do ano e ponderando cada uma das grandezas meteorológicas com diferentes pesos estatísticos. O mês/ano cuja função de distribuição acumulada de radiação solar global estiver mais próximo da distribuição dessa grandeza considerando todos os meses é escolhido para o AMT. O processo é repetido para cada um dos meses do ano e os vários meses/anos selecionados para o AMT são ligados entre si através de uma função de interpolação usando 12 registos horários centrados. Na utilização deste método é requerido que as medições não apresentem lacunas. Para o preenchimento das lacunas foram realizadas interpolações lineares e correlações entre estações.



A utilização do AMT ao invés do ano médio na simulação de sistemas de energia tem vantagens, uma vez que o AMT representa as variações diárias a que um sistema real está sujeito.

## 2. Filtragem, correção e validação dos dados

### 2.1. Dimensão da amostra de dados utilizada

Na elaboração deste relatório apenas consideraram-se as estações que possuíam uma amostra de dados mínima de cinco anos de medições completas. Os anos completos são compostos por medições horárias das diferentes grandezas meteorológicas estudadas. A dimensão da amostra de dados utilizada para cada estação é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Dimensão da amostra de dados das estações

<b>Estação</b>	<b>Data inicial</b>	<b>Data final</b>	<b>Tempo [ano]</b>
Areeiro	01/01/2003	31/12/2014	12
Canical	01/01/2010	31/12/2014	5
Funchal, Lido	01/01/2003	31/12/2014	12
Funchal, Observatório	01/01/2004	31/12/2014	11
Lombo da Terça	01/01/2010	31/12/2014	5
Lugar de Baixo	01/01/2003	31/12/2014	12
Ponta do Pargo	01/01/2008	31/12/2014	7
São Jorge	01/01/2003	31/12/2014	12

### 2.2. Filtragem da radiação solar global e correção da radiação solar difusa

Aplicaram-se às séries de dados da radiação solar global e radiação difusa (quando aplicável) os filtros utilizados na estação de Cabauw, Holanda [2]. 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 valores medidos pelos sensores de radiação que foram identificados pelo filtro foram classificados como falhas.

A radiação difusa é medida apenas na estação do Observatório através de um piranómetro com uma banda de sombreamento. A banda tem a função de bloquear a radiação solar direta. No entanto, ao bloquear a radiação solar direta bloqueia também parte da radiação difusa. Assim, foi aplicada uma correção que teve como objetivo determinar a radiação difusa que foi bloqueada pela banda. O método usado para efetuar essa correção é descrito em [3].



### 2.3. Filtragem das temperaturas máxima e mínima do ar

Para fazer a filtragem dos valores de temperatura foi utilizada a normal climatológica disponível para a ilha da Madeira, i.e., a normal climatológica do Funchal desde 1971-2000 [4].

Uma vez que os limites definidos pela normal podem ser ultrapassados, a filtragem das medições de temperatura mínima e máxima foi efetuada tendo essa possibilidade em consideração. Assim, foi definido um intervalo de temperatura adequado para cada estação, determinado de forma empírica, de acordo com a sua proximidade à estação de referência: a estação do Observatório no Funchal. Os intervalos de temperatura atribuídos a cada estação são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Intervalo de temperatura atribuído a cada estação

Estações	Intervalo de temperatura $\Delta T$ [°C]
Areeiro	15
Caniçal	8
Funchal, Lido	5
Funchal, Observatório	3
Lombo da Terça	8
Lugar de Baixo	8
Ponta do Pargo	10
São Jorge	10

Os valores de temperatura que se situavam fora destes intervalos foram classificados como falhas, tendo-se verificado uma pequena percentagem de valores que não passaram por este filtro.

### 2.4. Humidade Relativa e Velocidade média do Vento

No que diz respeito à humidade relativa e à velocidade média do vento, não foram aplicados filtros aos valores medidos, tendo-se apenas verificado se estas medições se encontravam dentro dos limites fisicamente possíveis.

## 3. Preenchimento de Lacunas

### 3.1. Radiação solar global

Neste relatório o preenchimento de lacunas da radiação solar global foi realizado mediante interpolação linear e correlação com estações próximas. A interpolação linear foi utilizada quando as lacunas eram de uma ou duas horas consecutivas. Nos casos em que as lacunas nas séries de dados eram superiores a duas horas, foram utilizadas correlações com outras estações. Nas correlações para a radiação solar global foram



utilizados os valores totais diários. No processo de cálculo dos valores da radiação total diária foram descartados os dias onde existissem lacunas, o que resulta numa correlação baseada apenas em medições reais. A correlação para a radiação solar global entre a estação do Observatório e a estação do Lido, i.e., Funchal é apresentada na Figura 1.

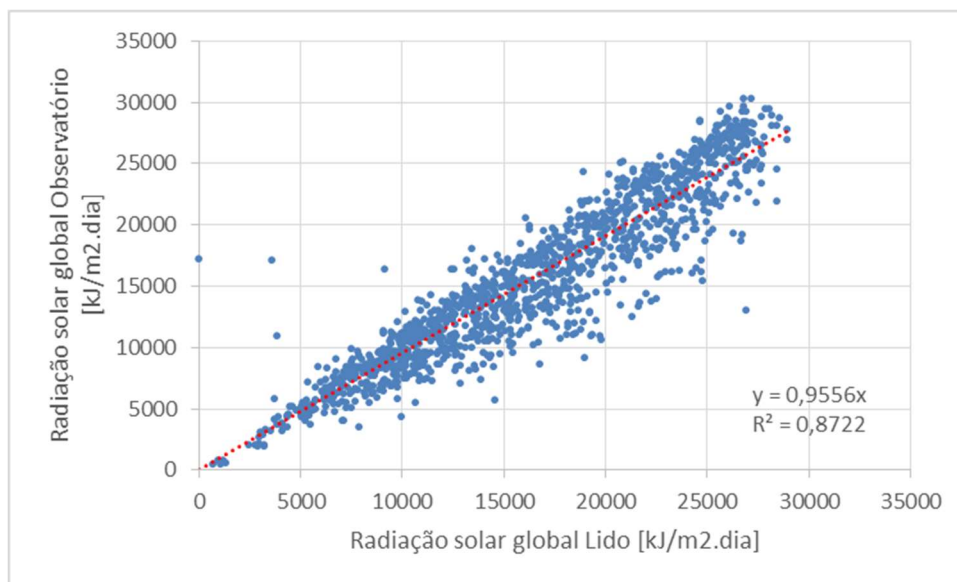


Figura 1 – Correlação para a radiação solar global entre a estação do Observatório e a estação do Lido

### 3.2. Radiação solar difusa

O preenchimento das lacunas existentes nas medições da radiação difusa foi realizado mediante interpolações lineares e a correlação de Liu e Jordan [3]. Foi utilizada interpolação linear quando as lacunas eram de uma ou duas horas consecutivas. Nos casos em que as lacunas eram superiores a duas horas, recorreu-se à correlação de Liu e Jordan. Esta correlação permite obter estimativas de radiação difusa horária através da média diária mensal, do ângulo horário e do ângulo horário do pôr-do-sol.

### 3.3. Temperatura do ar e Humidade Relativa média, máxima e mínima e Velocidade média do Vento

O preenchimento das lacunas existentes nas medições da temperatura média, máxima e mínima do ar, humidade relativa média, máxima e mínima e velocidade média do vento foi realizado mediante interpolação linear e correlação com estações próximas. Foi utilizada interpolação linear quando as lacunas eram de uma ou duas horas consecutivas. Nos casos em que as lacunas eram superiores a duas horas, recorreu-se a correlações com outras estações. A correlação para a temperatura média entre as estações do Observatório



e Lido é apresentada na Figura 2. A correlação para a humidade relativa média entre as estações do Observatório e Lido é apresentada na Figura 3. A correlação para a velocidade média do vento entre as estações do Observatório e Lido é apresentada na Figura 4.

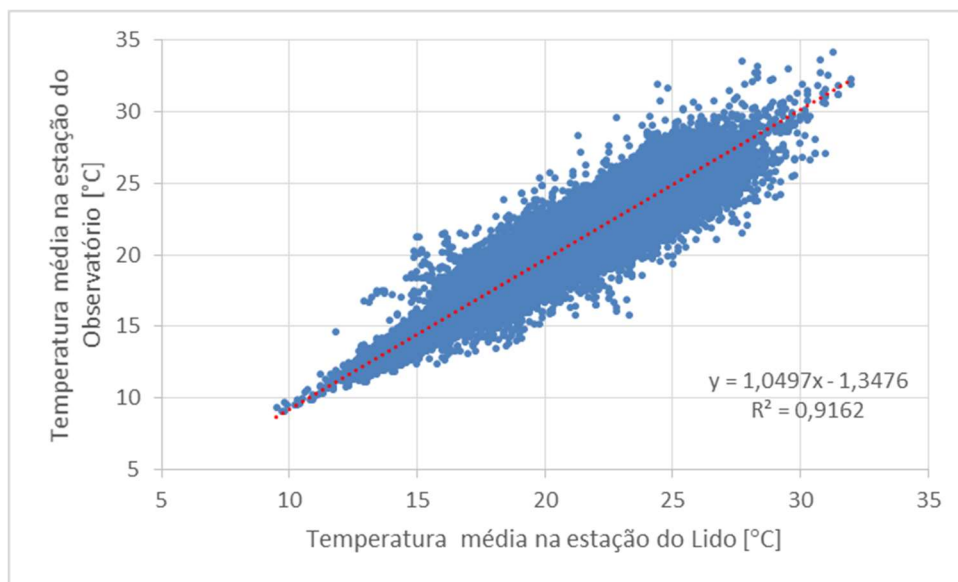


Figura 2 – Correlação para a temperatura média do ar entre a estação do Observatório e a estação do Lido.

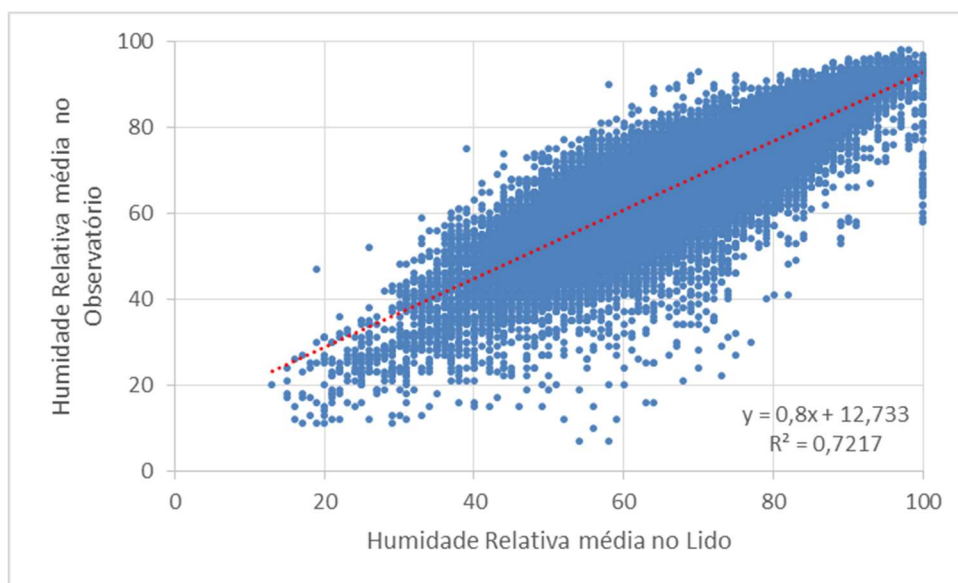


Figura 3 – Correlação para a humidade relativa média entre a estação do Observatório e a estação do Lido.



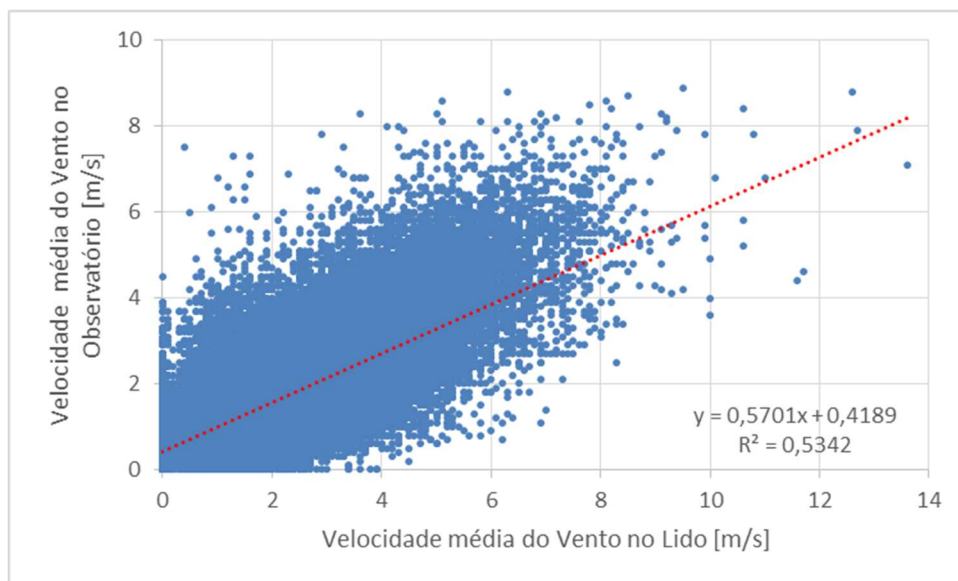


Figura 4 – Correlação para a velocidade média do vento entre a estação do Observatório e a estação do Lido.

A única estação em que esta metodologia não foi aplicável foi a estação do Caniçal. Devido ao seu perfil característico da velocidade média do vento e à sua localização geográfica, não foi possível estabelecer uma boa correlação com outra estação. A forma de contornar este problema e obter os valores necessários para a determinação do AMT, para a estação do Caniçal, foi admitir que quando existe uma lacuna na estação do Caniçal, a velocidade do vento nessa hora é igual à velocidade do vento na estação de São Jorge, que é a estação mais próxima.

A percentagem de dados gerada em cada estação, para cada grandeza, em relação à amostra total de dados dessa estação é representada na Tabela 3.

Tabela 3 - Percentagem de dados gerados para cada grandeza

Estações	Temperatura [°C]	Radiação Solar Global [kJ/m <sup>2</sup> ]	Radiação Difusa [kJ/m <sup>2</sup> ]	Velocidade do Vento [m/s]	Humidade Relativa [%]
Areeiro	4.6	14.3	-	4.4	4.7
Caniçal	1.6	3.7	-	1.6	1.6
Funchal, Lido	7.3	8.4	-	9.4	10.8
Funchal, Observatório	0.7	23.1	23.1	3.9	0.7
Lombo da Terça	10.8	12.1	-	12.6	6.5
Lugar de Baixo	1.1	9.6	-	1.1	1.1
Ponta do Pargo	0.3	4.8	-	0.3	4.6
São Jorge	1.5	10.3	-	1.5	2.2



### 3.4. Cálculo de médias e extremos

Uma vez que a maioria das estações não apresenta medições para a temperatura média horária, esta foi calculada através da média entre a temperatura mínima e a temperatura máxima para cada hora. Embora este valor possa não corresponder verdadeiramente à temperatura média horária real, esta foi a metodologia encontrada para solucionar este problema. Quanto à intensidade máxima do vento, considerou-se que a intensidade máxima do vento num determinado dia correspondia à intensidade média máxima horária desse dia, não se considerando assim o valor da rajada máxima de vento.

## 4. Determinação do Ano Médio

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. Exclui-se assim todos os dados considerados como falhas. A percentagem de dados da amostra usada no cálculo do ano médio, em relação ao total de dados sem lacunas, para cada estação, é representada na Tabela 4.

Tabela 4 - Percentagem de dados utilizados na elaboração do ano médio

Estações	Temperatura [°C]	Radiação Solar Global [kJ/m <sup>2</sup> ]	Radiação Difusa [kJ/m <sup>2</sup> ]	Velocidade do Vento [m/s]	Humidade Relativa [%]
Areiro	95.4	85.7	-	95.6	95.3
Canical	98.4	96.3	-	98.4	98.4
Funchal, Lido	92.7	91.6	-	90.6	89.2
Funchal, Observatório	99.3	76.9	76.9	96.1	99.3
Lombo da Terça	89.2	87.9	-	87.4	93.5
Lugar de Baixo	98.9	90.4	-	98.9	98.9
Ponta do Pargo	99.7	95.2	-	99.7	95.4
São Jorge	98.5	89.7	-	98.5	97.8

Para uma melhor representação do ano médio, foi construída uma matriz dia x hora cujos elementos  $A_{ij}$  são valores médios e com  $i = 1, \dots, 365$  e  $j = 1, \dots, 24$ . Esta matriz resulta da média centrada móvel resultante do cálculo do ano médio de modo a captar os padrões de variação de cada uma das grandezas estudadas. Esta média é calculada através dos valores da hora  $j$  nos dias  $i-2$ ,  $i-1$ ,  $i$ ,  $i+1$  e  $i+2$ . Na secção 6.1 encontram-se algumas representações do ano médio para a estação do Observatório. As representações do ano médio para as restantes estações encontram-se no ficheiro em anexo.



## 5. Determinação do Ano Meteorológico Típico

O ano meteorológico típico (AMT) para as diferentes estações foi determinado através da construção de um modelo em Matlab. O modelo tem como entrada as medições sem lacunas de temperatura média, máxima e mínima, humidade relativa média, máxima e mínima, velocidade média e máxima do vento e radiação solar global.

De acordo com o método utilizado, nem todos os parâmetros têm o mesmo peso estatístico na escolha do AMT pelo que foram atribuídos diferentes coeficientes de ponderação a cada uma das grandezas analisadas. O peso estatístico atribuído a cada grandeza encontra-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Peso estatístico atribuído a cada grandeza

Grandeza	Peso
Temperatura média	2/24
Temperatura máxima	1/24
Temperatura mínima	1/24
Humidade Relativa média	2/24
Humidade Relativa máxima	1/24
Humidade Relativa mínima	1/24
Intensidade média do Vento	2/24
Intensidade máxima do Vento	2/24
Radiação solar global	12/24

Após a execução do modelo, é obtido o AMT e é gerado um ficheiro em Excel com os dados horários dos diferentes parâmetros. As representações do AMT para a estação do Observatório estão na secção 6.2. As representações do AMT para as restantes estações foram enviadas no ficheiro anexo. Os ficheiros em Excel para cada uma das estações analisadas foram enviados no ficheiro em anexo.

## 6. Resultados preliminares

### 6.1. Ano médio

O ano médio para a estação do Observatório, para a radiação solar global, radiação difusa, temperatura média do ar, humidade relativa média e velocidade média do vento está representado na Figura 5, na Figura 6, na Figura 7, na Figura 8 e na Figura 9 respetivamente. As figuras representativas das restantes estações estão disponíveis no ficheiro anexo.

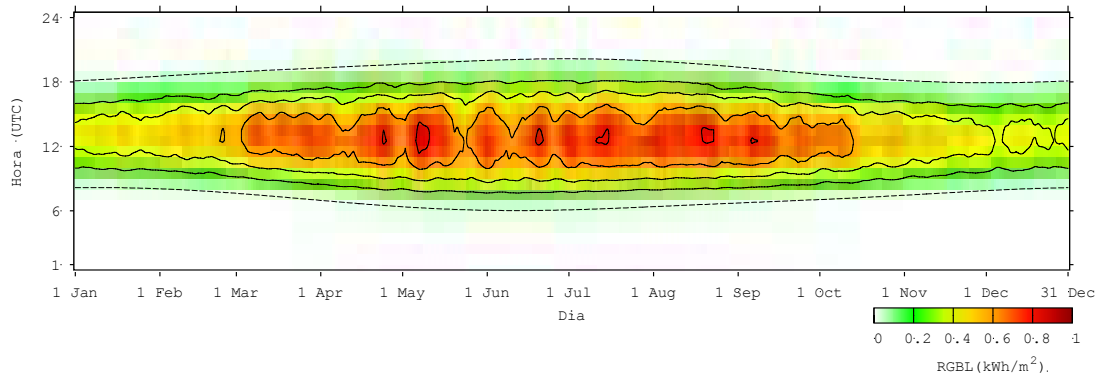


Figura 5 - Representação do ano médio para a radiação solar global na estação do Observatório.

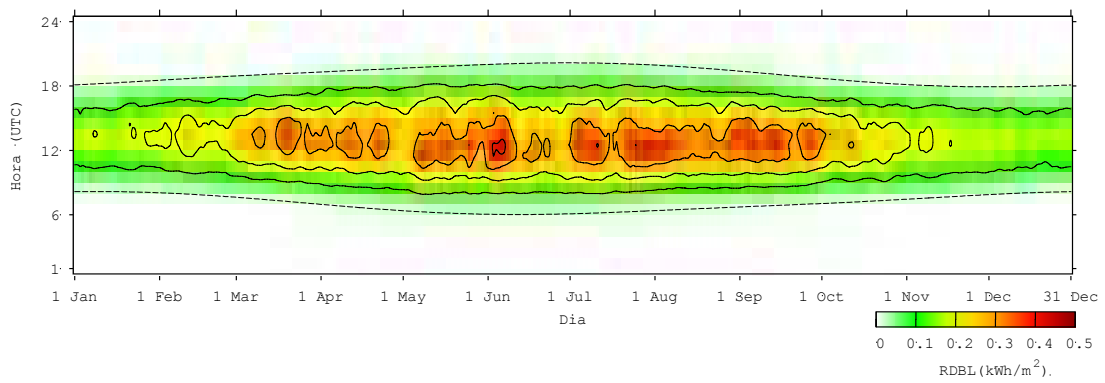


Figura 6 - Representação do ano médio para a radiação difusa na estação do Observatório.

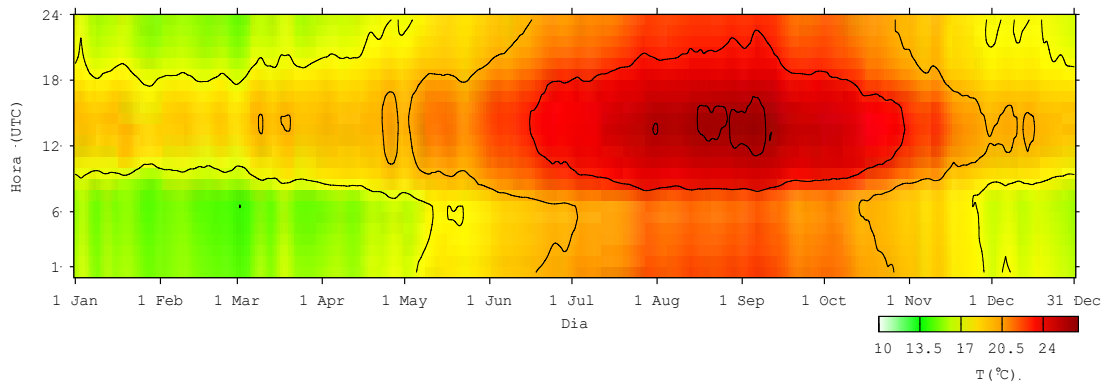


Figura 7 - Representação do ano médio para a temperatura média do ar na estação do Observatório.

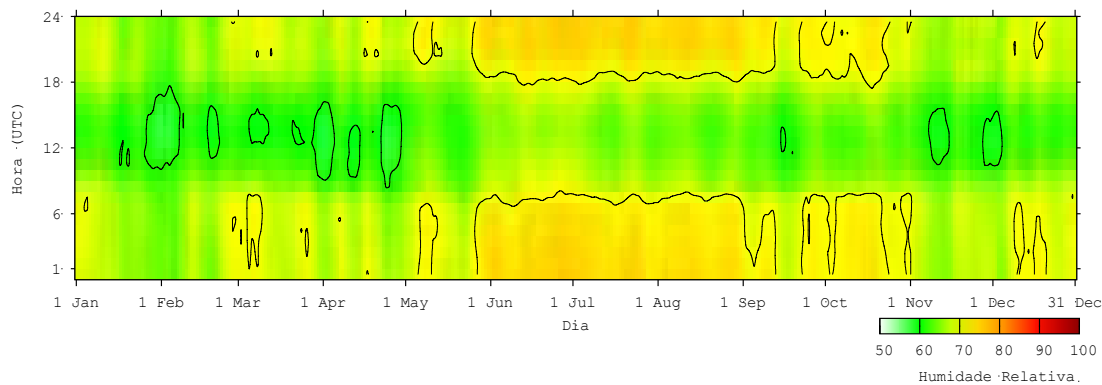


Figura 8 - Representação do ano médio para a humidade relativa média na estação do Observatório.

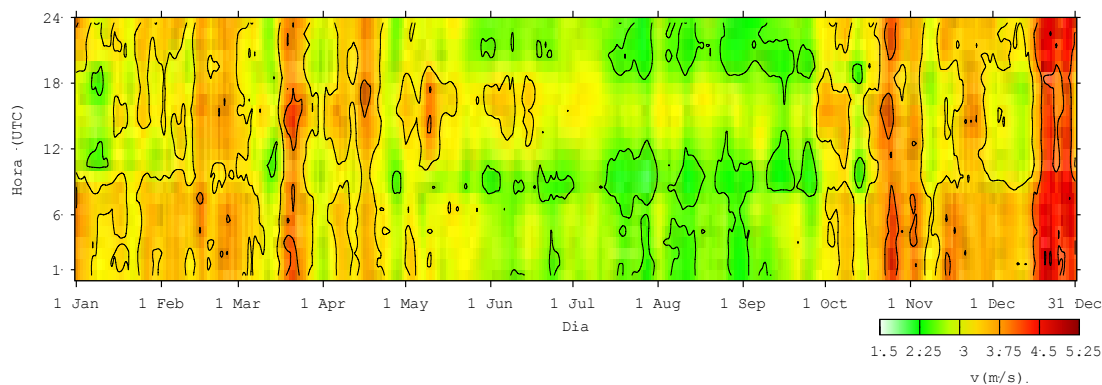


Figura 9 - Representação do ano médio para a intensidade média do vento na estação do Observatório.

## 6.2. Ano Meteorológico Típico

As funções de distribuição acumulada (CDF) obtidas para a estação do Observatório, para a radiação solar global e para a temperatura média do ar estão representadas na Figura 10 e na Figura 11, respetivamente. As CDF's para as restantes grandezas e estações foram enviadas no ficheiro em anexo. A média de longo prazo está representada a preto. A CDF do ano mais próximo da média de longo prazo está representada a verde. A CDF do ano mais afastado da média de longo prazo está representada a vermelho. A CDF do ano escolhido para o AMT está representada a azul. Uma vez que o peso estatístico da radiação solar global é elevado, muitas das vezes a CDF que representa o ano escolhido para o AMT corresponde também à CDF que se encontra mais próxima da média de longo prazo. Neste caso, apenas é apresentada a CDF que corresponde ano escolhido para o AMT.

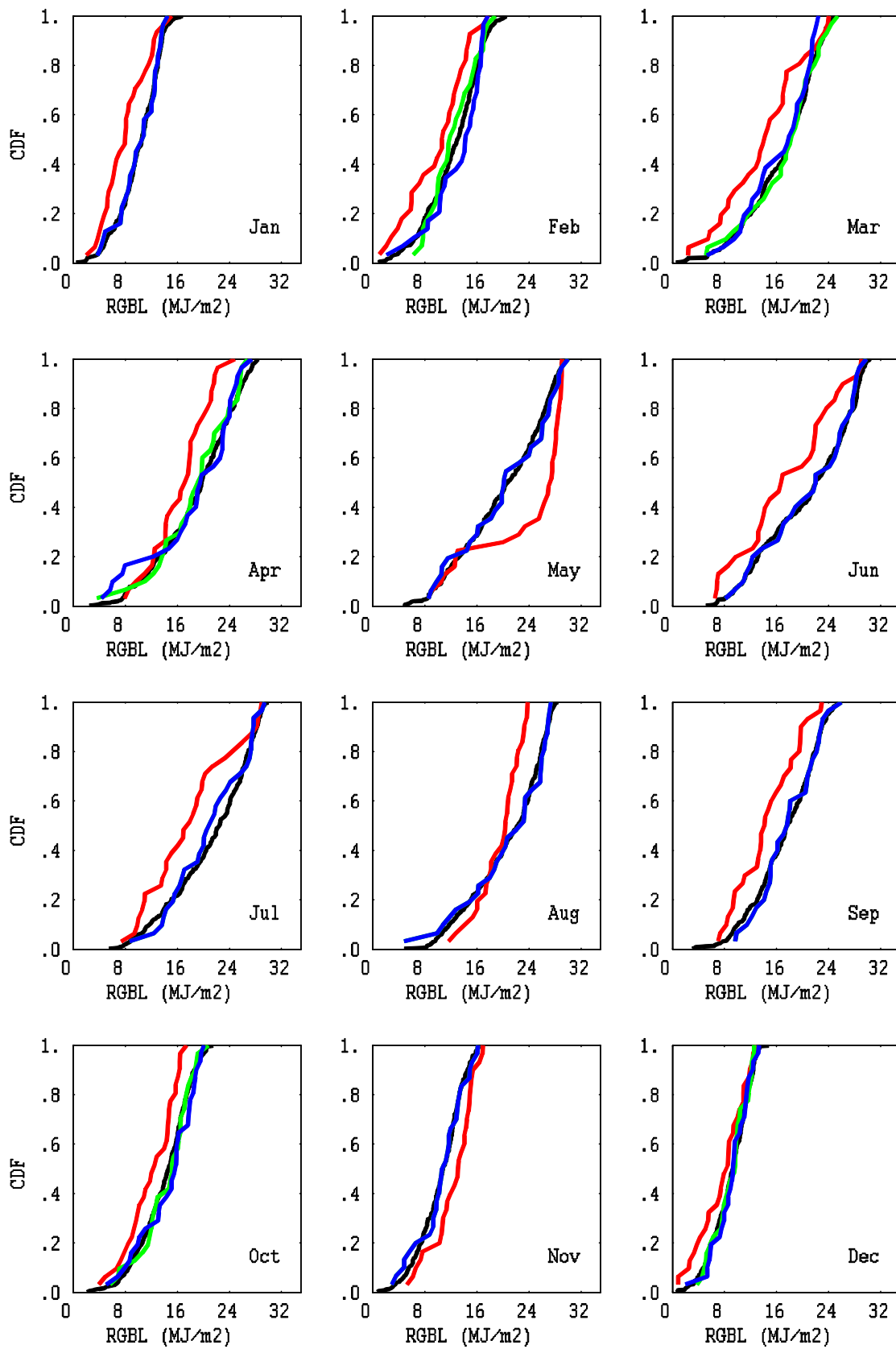


Figura 10 - Representação das CDF's para a radiação solar global para a estação do Observatório.

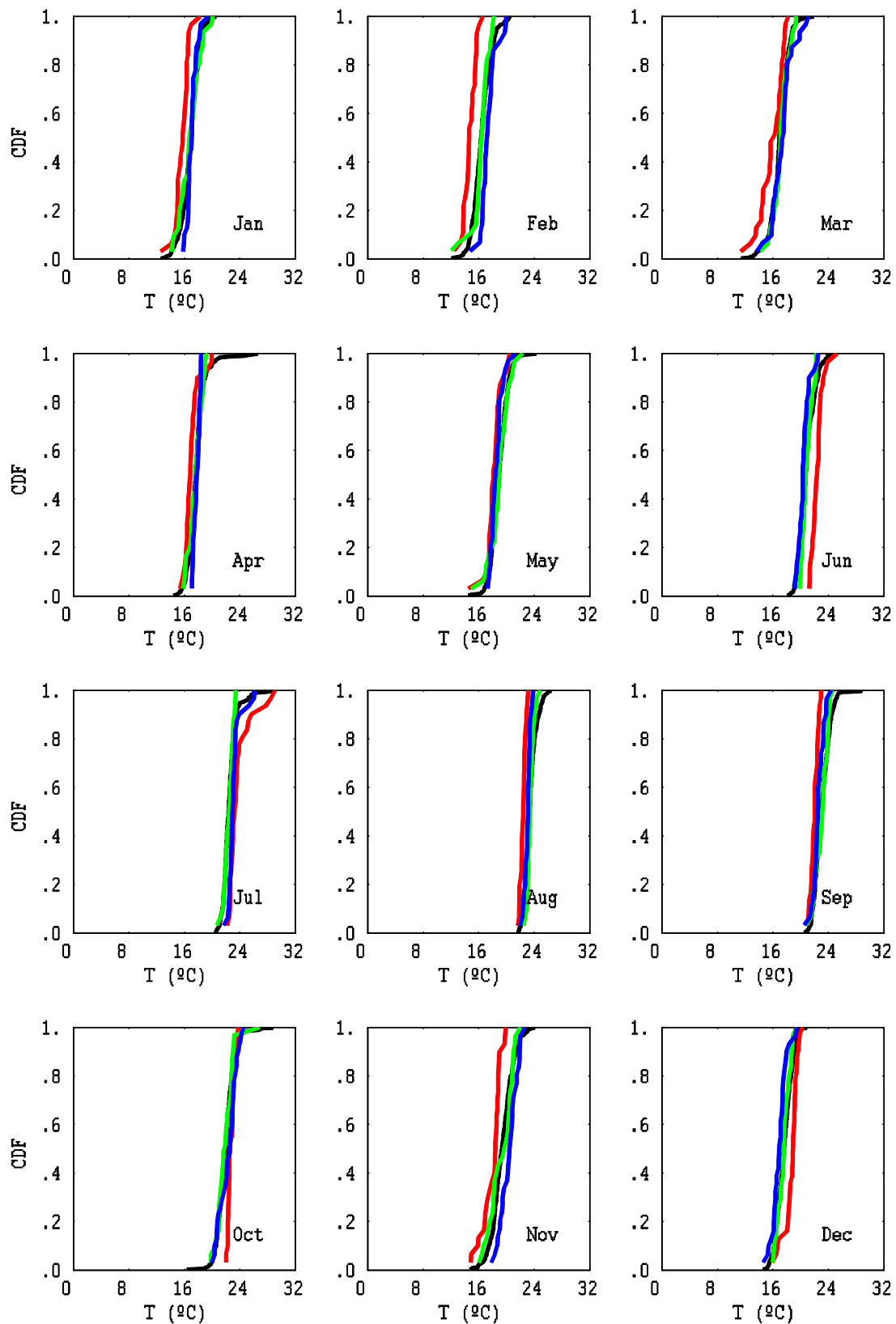


Figura 11 - Representação das CDF's para a temperatura média do ar para a estação do Observatório.



De modo a validar a escolha do AMT comparou-se o valor médio mensal de toda a amostra de dados com o valor médio mensal do AMT, para as diversas grandezas. O resultado desta comparação para a temperatura média do ar e para a radiação solar global, na estação do Observatório é mostrado na Figura 12 e na Figura 13, respetivamente. Note-se que as grandezas têm diferentes pesos na escolha do AMT, o que tem uma implicação direta na proximidade com os respectivos valores médios mensais. As comparações efetuadas para as restantes grandezas e estações foram enviadas no ficheiro em anexo.

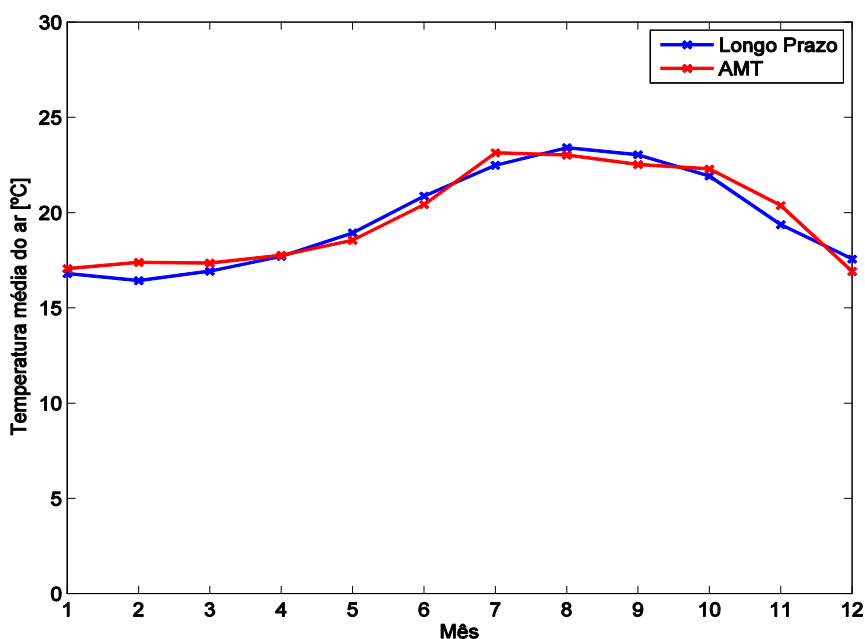


Figura 12 - Comparação das médias mensais da temperatura média do ar na estação do Observatório.

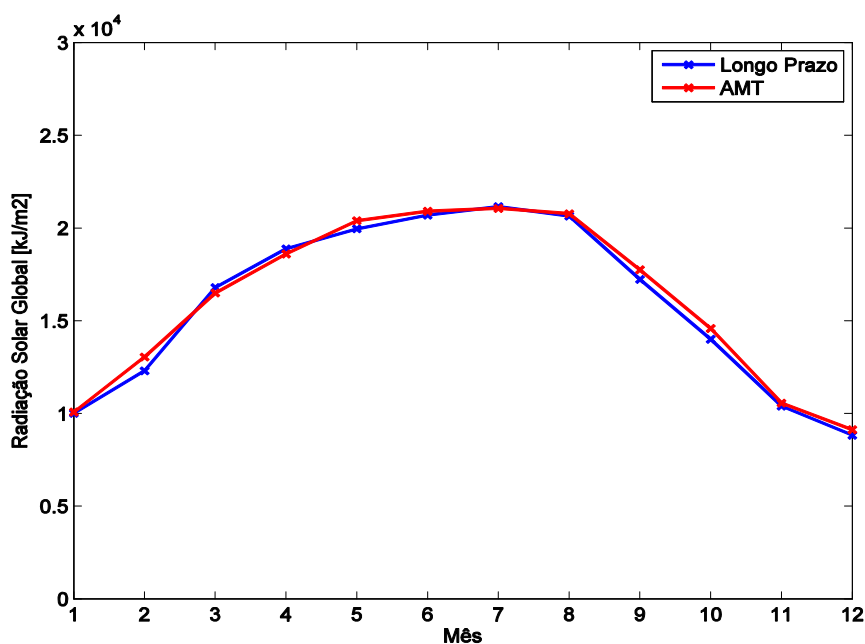


Figura 13 - Comparação dos totais mensais da radiação solar global na estação do Observatório.





O AMT para a estação do Observatório, para a radiação solar global, temperatura média do ar, humidade relativa média e velocidade média do vento está representado na Figura 14, na Figura 15, na Figura 16 e na Figura 17 respetivamente. As figuras representativas das restantes estações foram enviadas no ficheiro em anexo.

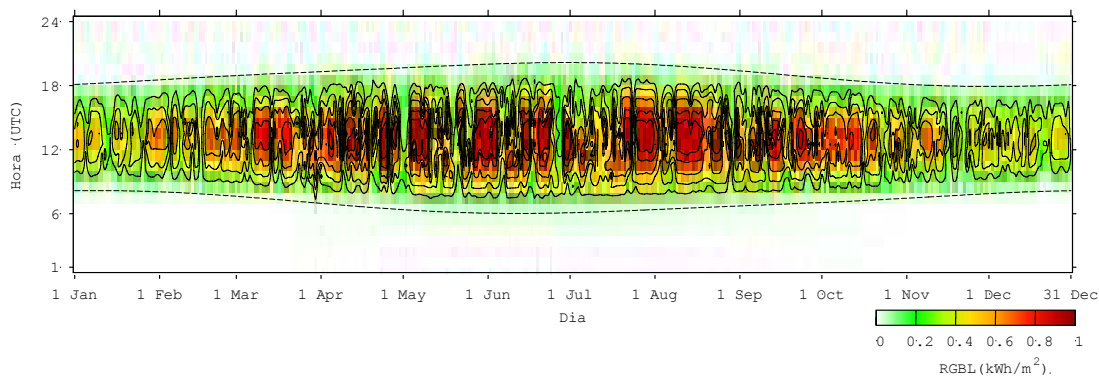


Figura 14 - Representação do AMT para a radiação solar global na estação do Observatório.

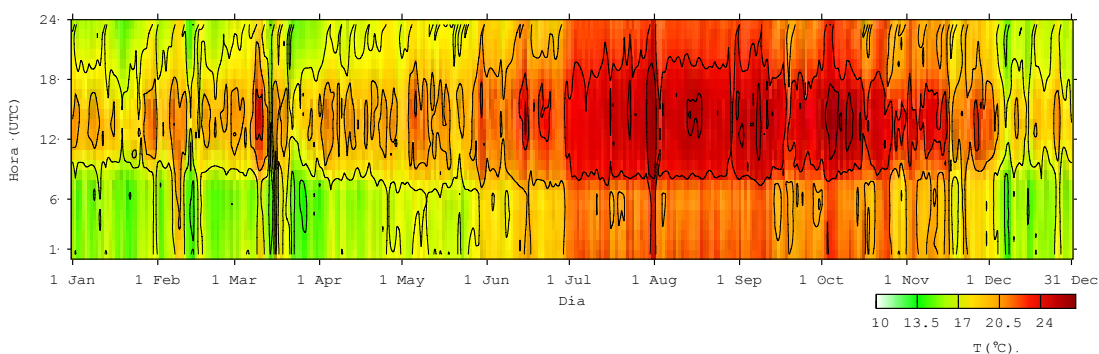


Figura 15 - Representação do AMT para a temperatura média do ar na estação do Observatório.

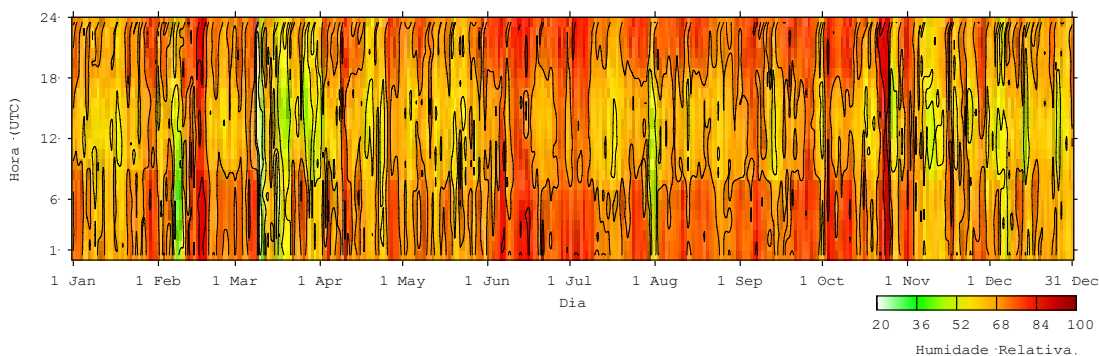


Figura 16 - Representação do AMT para a humidade relativa média na estação do Observatório.

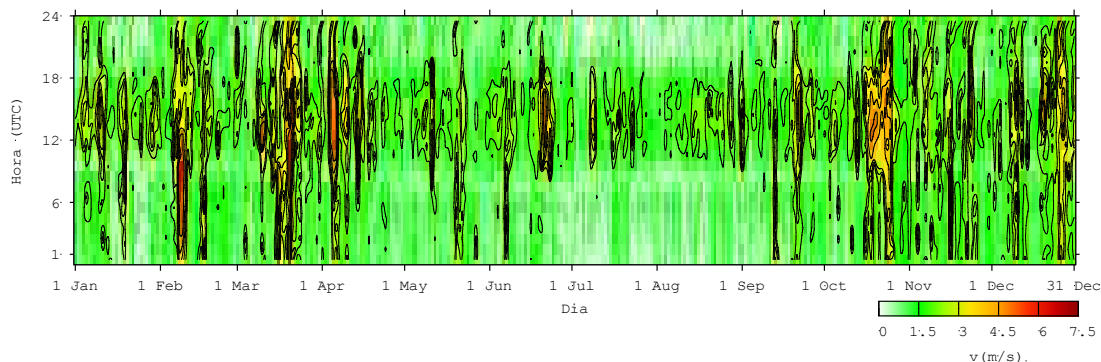


Figura 17 - Representação do AMT para a intensidade média do vento na estação do Observatório.

Os anos escolhidos para formar o AMT para cada uma das estações analisadas são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - AMT para as estações analisadas

<b>Estações</b>	<b>Jan.</b>	<b>Fev.</b>	<b>Mar.</b>	<b>Abr.</b>	<b>Mai.</b>	<b>Jun.</b>	<b>Jul.</b>	<b>Ago.</b>	<b>Set.</b>	<b>Out.</b>	<b>Nov.</b>	<b>Dez.</b>
<b>Funchal, Observatório</b>	2004	2008	2007	2006	2009	2014	2009	2011	2008	2006	2009	2014
<b>Funchal, Lido</b>	2009	2006	2005	2010	2005	2003	2012	2010	2012	2013	2009	2008
<b>Areiro</b>	2007	2003	2004	2010	2012	2012	2005	2009	2013	2013	2009	2005
<b>São Jorge</b>	2010	2006	2004	2006	2003	2005	2014	2009	2010	2003	2007	2007
<b>Lugar de Baixo</b>	2007	2009	2009	2014	2008	2014	2005	2012	2011	2013	2014	2008
<b>Canical</b>	2010	2013	2011	2010	2010	2012	2014	2014	2013	2012	2014	2011
<b>Ponta do Pargo</b>	2013	2011	2011	2010	2012	2013	2012	2014	2010	2009	2011	2013
<b>Lombo da Terça</b>	2010	2013	2014	2010	2010	2014	2012	2013	2014	2013	2010	2014

## 7. Conclusões e Trabalho Futuro

Após o tratamento dos dados fornecidos pelo IPMA, foi possível proceder à construção de um ano médio e de um ano meteorológico típico para todas as estações meteorológicas e grandezas analisadas. Através do cálculo do ano médio foi possível identificar os padrões climatológicos das diversas estações analisadas. Relativamente à construção do AMT, podemos comprovar a eficácia do modelo concebido para o efeito, recorrendo à comparação entre a média de longo prazo e a média do AMT. Como se pode observar na Figura 12 e na Figura 13, as médias encontram-se muito próximas. Desta forma é possível afirmar que o AMT representa uma importante ferramenta na simulação de sistemas de energia solar, uma vez que contém as variações horárias a que um sistema real está sujeito. Com estes resultados, pretende-se a publicação de um artigo numa revista científica



reportando a criação do AMT para a ilha da Madeira à semelhança do que tem sido publicado para outros locais do planeta [5-8].

## 8. Referências bibliográficas

[1] Wilcox S. and Marion W., Users Manual for TMY3 Data Sets, National Renewable Energy Laboratory, pp. 11-20, 2008.

[2] Long C.N. and Dutton E.G., BSRN Global Network recommended QC tests, V2.0, BSRN Technical Report, 2002.

[3] Iqbal M., An Introduction to Solar Radiation, Academic Press, 1983.

[4] Normal climatológica do Funchal, Observatório, 1971-2000, disponível em <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/1971-2000/009/>.

[5] Skeiker, Kamal, Generation of a typical meteorological year for Damascus zone using the Filkenstein–Schafer statistical method, Energy Conversion and Management 45:99–112, 2004.

[6] Chan, Apple L.S., Chow, T.T., Fong, Square K.F., Lin, John Z., Generation of a typical meteorological year for Hong Kong, Energy Conversion and Management 47:87–96, 2006.

[7] Kalogirou, Soteris A., Generation of typical meteorological year (TMY-2) for Nicosia, Cyprus, Renewable Energy 28:2317–2334, 2003.

[8] Pusat, Saban, Ekmekçi, Ismail, Akkoyunlu, Mustafa Tahir, Generation of typical meteorological year for different climates of Turkey, Renewable Energy 75:144-151, 2015.