

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

BACHARELADO EM METEOROLOGIA

PAULA SILVA FERREIRA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA PELA MEDIÇÃO DA
RADIÇÃO SOLAR INCIDENTE EM SUPERFÍCIE NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA
DA ILHA DO FUNDÃO – RJ**

Rio de Janeiro/ RJ

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

BACHARELADO EM METEOROLOGIA

PAULA SILVA FERREIRA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA PELA MEDIÇÃO DA
RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE EM SUPERFÍCIE NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA
DA ILHA DO FUNDÃO – RJ**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (CCMN/UFRJ), para a obtenção do título de Meteorologista.

Orientadora: Prof. Dr. Célia Maria Paiva.

Rio de Janeiro/ RJ

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
BACHARELADO EM METEOROLOGIA

PAULA SILVA FERREIRA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA PELA MEDIÇÃO DA
RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE EM SUPERFÍCIE NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA
DA ILHA DO FUNDÃO – RJ**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (CCMN/UFRJ), como requisito para a obtenção do título de Meteorologista.

Aprovado em: 28/03/2018

Examinado por:



Prof. Dr. Célia Maria Paiva.



Prof. Dr. Luiz Francisco Pires Guimarães Maia.



Prof. MSc. Talita Reis Antunes Pereira.

RESUMO

A principal forma de geração de energia elétrica no Brasil é a hidroelétrica, que depende do regime de precipitação. Contudo, eventos extremos, em que há escassez de chuva afetam a sua geração e seu abastecimento. Faz-se necessário que outras fontes de geração de energia sejam investigadas, para oferecer mais opções para os diversos setores econômicos e à população. De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, o Rio de Janeiro está localizado em uma região onde o total diário de irradiância solar global horizontal fica entre 3,0 e 6,5 $\text{kW.h.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Com dados de irradiância solar global horizontal, da Estação Meteorológica da Ilha do Fundão do ano de 2017, obteve-se valores médios, máximos e mínimos mensais dessa grandeza. Verificou-se que, nos meses de inverno têm menor média de irradiância solar global horizontal e os meses de verão maior média de irradiância solar global horizontal. A irradiância de janeiro foi a maior total mensal, com $201,69 \text{ kW.h.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$; e maior média com $6,51 \text{ kW.h.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$; enquanto que dezembro teve o maior máximo mensal de irradiância solar global horizontal; $13,61 \text{ kW.h.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e o menor mínimo ficou com o mês de maio; $0,46 \text{ kW.h.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Isso concordou com o esperado pelo ciclo sazonal e com o que foi analisado pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar. A estação meteorológica apresentou irradiância compatível com o que se espera para a região Sudeste segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar. Tal região apresentou irradiância superior ao de Portugal, país europeu de maior irradiância média diária. À vista disso, sendo compatível com a média anual do Sudeste, a localização da Estação Meteorológica da Ilha do Fundão possui alto potencial de geração de energia solar.

Palavras chave: Energia solar, Irradiância Solar Global Horizontal.

ABSTRACT

The main energy source in Brazil is the hydroelectric and depends on the precipitation regime. However, extreme events in which there is a scarcity of rain affect the supply and generation. It is necessary for other sources of energy to be investigated to offer more options for the various economic sectors and the population. According to the Brazilian Atlas of Solar Energy, the Rio de Janeiro state is located in a region where the daily total global horizontal solar irradiance is between 3.0 and 6.5 kW.h.m⁻².day⁻¹. With data from the Meteorological Station of Ilha do Fundão the year 2017 horizontal global solar irradiation was measured so it was possible to obtain the horizontal global solar irradiation average, maximum and minimum of the station. It was found that the winter months had a lower average global horizontal solar irradiance and the summer months had mean higher global horizontal solar irradiance. January was the month with the highest monthly total, 201.69 kW.h.m⁻².day⁻¹, and the highest average, 6.51 kW.h.m⁻².day⁻¹, while December had the largest and the highest maximum of horizontal global solar irradiation, 13.61 kW.h.m⁻².day⁻¹, and May had the lowest minimum, 0.46 kW.h.m⁻².day⁻¹. This agreed to the seasonal cycle that was analyzed by the Brazilian Atlas of Solar Energy. The station presented irradiance compatible with what is expected for the southeast region according to the Brazilian Atlas of Solar Energy. This region presented superior irradiance to Portugal, the European country with the highest daily irradiance. Accordingly, the Meteorological Station of Ilha do Fundão has a high potential for generating solar energy.

Keywords: Solar energy, Horizontal global solar irradiation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estações do ano.....	13
Figura 2 – Declinação solar.....	13
Figura 3 - O espectro eletromagnético.....	14
Figura 4 - Lei de Radiação de Planck.....	16
Figura 5 - Espectro eletromagnético da radiação solar e sua atenuação.....	18
Figura 6 - Tipos de irradiância solar que incidem em superfície.....	19
Figura 7 - Média mensal de 1999 a 2015 de janeiro do total diário de irradiação solar global horizontal.....	20
Figura 8 - Média mensal de 1999 a 2015 de fevereiro do total diário de irradiação solar global horizontal.....	21
Figura 9 - Média mensal de 1999 a 2015 de março do total diário de irradiação solar global horizontal.....	22
Figura 10 - Média mensal de 1999 a 2015 de abril do total diário de irradiação solar global horizontal.....	23
Figura 11 - Média mensal de 1999 a 2015 de maio do total diário de irradiação solar global horizontal.....	24
Figura 12 - Média mensal de 1999 a 2015 de junho do total diário de irradiação solar global horizontal.....	25
Figura 13 - Média mensal de 1999 a 2015 de julho do total diário de irradiação solar global horizontal.....	26
Figura 14 - Média mensal de 1999 a 2015 de agosto do total diário de irradiação solar global horizontal.....	27
Figura 15 - Média mensal de 1999 a 2015 de setembro do total diário de irradiação solar global horizontal.....	28
Figura 16 - Média mensal de 1999 a 2015 de outubro do total diário de irradiação solar global horizontal.....	29

Figura 17 - Média mensal de 1999 a 2015 de novembro do total diário de irradiação solar global horizontal.....	26
Figura 18 - Média mensal de 1999 a 2015 de dezembro do total diário de irradiação solar global horizontal.....	27
Figura 19 – Comparativo das médias da irradiação global horizontal no Brasil e em alguns países da Europa ($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$).....	28
Figura 20 – Localização da Estação Meteorológica da Ilha do Fundão.....	33
Figura 21 - Total Mensal de Irradiância Solar Global Horizontal Diária em 2017 - Ilha do Fundão.....	35
Figura 22 - Média Mensal de Irradiância Solar Global Horizontal Diária em 2017 - Ilha do Fundão.....	36
Figura 23 - Máximo Mensal de Irradiância Solar Global Horizontal Diária em 2017 - Ilha do Fundão.	36
Figura 24 - Mínimo Mensal de Irradiância Solar Global Horizontal Diária em 2017 - Ilha do Fundão.....	37

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EPE	A Empresa de Pesquisa Elétrica
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
SONDA	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	RADIAÇÃO SOLAR E TERRESTRE	12
2.1.1	Relações astronômicas entre o Sol e a Terra	13
2.1.2	Radiação térmica	14
2.1.3	A constante solar	16
2.1.4	Irradiação extraterrestre em superfície horizontal	16
2.1.5	Irradiância solar na superfície terrestre	17
2.1.6	Tipos de irradiância solar que incidem em superfície	18
2.2	ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR	19
2.3	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E SEU USO NO MUNDO	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	DADOS UTILIZADOS	33
3.2	MÉTODOS	33
4	RESULTADOS	34
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
	REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, no ano de 2010, o terceiro maior setor de consumo de energia foi o residencial, representando 27% do total (Nejat et al., 2015). A Empresa de Pesquisa Elétrica (EPE) estima que em de 2015 para 2016, o consumo de energia elétrica em residências tenha aumentado 1,3% na região Sudeste. No estado do Rio de Janeiro, o consumo foi de 39.886 GWh em 2016 (EPE, 2017). Dependendo de poucas alternativas para a obtenção de energia pode ser um problema quando ocorrem variações ambientais naturais. Pensar em outras possibilidades pode ser o caminho para um consumo mais sustentável.

Em 2014, a Região Metropolitana de São Paulo sofreu uma crise hídrica devido à escassez de água, por conta de uma seca prolongada (Oliveira, 2015). Isso levou a uma crise energética que afetou a população e o setor energético. Sabe-se que a principal fonte de energia no Brasil é a hidroelétrica e que alterações no regime de precipitação podem levar a mudanças no consumo de energia. No Brasil, a energia hidroelétrica representa 61,27%, enquanto que a energia solar representa 0,02% da matriz elétrica nacional (ANEEL, 2017). São necessárias alternativas para o consumo de energia no país tendo em mente possíveis alterações ambientais, principalmente ao que se refere ao regime de precipitação, de curto ou longo prazo, e a energia solar é uma promissora candidata para tal.

A irradiância que chega até o planeta vinda do sol é, em média, 1367 W/m². Essa energia é redistribuída pelo globo através de diversos processos, sendo que 51% dessa energia é absorvida. Essa porcentagem restante que é utilizável para captação de energia. Contudo, esses valores variam de acordo com a estação do ano.

A localização do país é favorável para obtenção de energia solar, pois se encontra nos trópicos, região que possui taxa de absorção de radiação excedente à taxa de perda. Além disso, a estação do ano influencia na variação da incidência de energia solar disponível para ser absorvida pela superfície. Levando em conta esses fatores, o potencial de geração solar fotovoltaica é maior no verão nas regiões sul e sudeste (Pereira et al., 2017).

Portanto, a utilização de fontes alternativas para consumo de energia é de notável importância em todo o mundo, mas, principalmente, para o Brasil, onde a principal forma de energia utilizada depende do regime de precipitação, que sofre variações sazonais e interanuais, com anos de excedente e escassez. A energia solar fotovoltaica pode ser uma possível solução. Assim, estudos detalhados sobre seu potencial tornam-se necessários.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de energia solar incidente na localidade da Estação Meteorológica da Ilha do Fundão na Cidade Universitária

da Universidade Federal do Rio de Janeiro(UFRJ) no município do Rio de Janeiro. Para tanto, os seguintes procedimentos foram considerados.

- I. Cálculo da média anual e das médias mensais do total diário de irradiação solar global horizontal medidos na Estação Meteorológica da Ilha do Fundão;
- II. Comparação dos resultados obtidos na Ilha do Fundão com os apresentados no Atlas Brasileiro de Energia Solar.
- III. Comparação do potencial de energia solar incidente na localidade da Estação Meteorológica da Ilha do Fundão com as demais regiões brasileiras;
- IV. Comparação do potencial de energia solar incidente na localidade da Estação Meteorológica da Ilha do Fundão com o que se observa em países onde essa tecnologia já está bem estabelecida, como Alemanha, Espanha, Itália, Portugal e França.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RADIAÇÃO SOLAR E TERRESTRE

2.1.1 Relações astronômicas entre o Sol e a Terra

A distância média entre o Sol e o planeta é aproximadamente $1,496 \cdot 10^8$ km. Como a órbita da Terra em torno do Sol é elíptica, a distância não é a mesma ao longo do ano. O ponto mais próximo, o periélio, ocorre em 3 de janeiro e o ponto mais distante, afélio, ocorre em 4 de julho, (Iqbal, 1983).

Outro fator astronômico importante é a inclinação da Terra com o seu eixo de rotação. O hemisfério voltado para o sol recebe mais radiação. Atualmente a inclinação é de $23,5^\circ$. Essa inclinação define as estações do ano, o hemisfério sul tem o verão com datas aproximadamente entre 21 de dezembro a 20 de março; o outono, aproximadamente de 20 de março a 21 de junho; o inverno aproximadamente de 21 de junho a 22 de setembro e a primavera, aproximadamente, de 22 de setembro a 21 de dezembro. Durante o verão a incidência de radiação é maior, isto porque o hemisfério está voltado para o sol devido a inclinação da Terra; no inverno ocorre o contrário, a inclinação desfavorece a incidência solar deixando o hemisfério do lado oposto ao sol (Iqbal, 1983).

O plano da órbita terrestre se chama eclíptica. A rotação da Terra causa a variação diurna de radiação incidente. O ângulo entre o plano equatorial terrestre e a linha que liga o centro da Terra e do Sol mudam a cada instante. Esse ângulo é chamado de declinação solar, que é positivo no hemisfério norte e negativo no hemisfério sul. É zero nos equinócios, $23,5^\circ$ no solstício de verão e $-23,5^\circ$ no solstício de inverno, (Iqbal, 1983). A declinação serve para obter o início exato das estações, já que dividi-las por datas não as torna muito precisas.

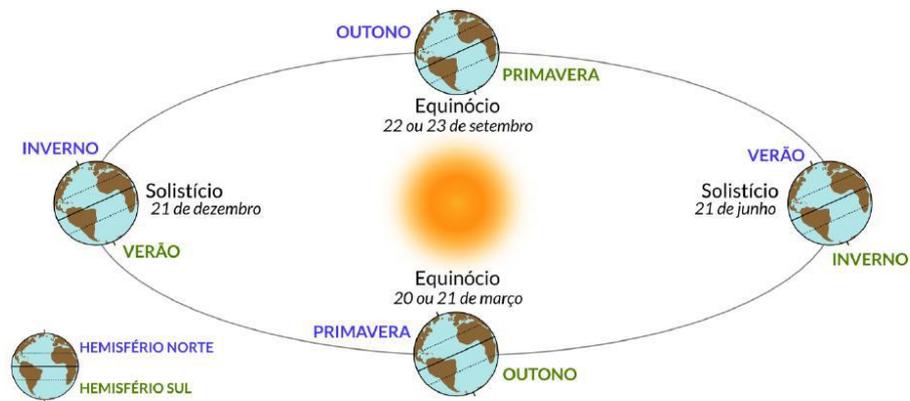


Figura 1 – Estações do ano.

Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar.

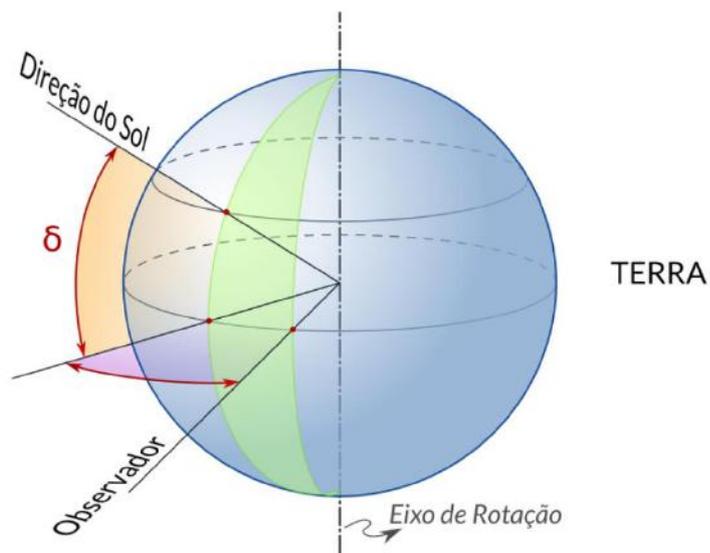


Figura 2 – Declinação solar.

Fonte: Adaptado de Atlas Brasileiro de Energia Solar.

As relações aqui descritas influenciam na forma como ocorre a transferência de energia do Sol para a Terra e isso trará implicações na quantidade de radiação que chega na atmosfera em seus diferentes níveis e na superfície terrestre.

2.1.2 Radiação térmica

A radiação proveniente do Sol tem extrema importância na transferência de energia na atmosfera. A transferência de energia do Sol para a Terra se dá por irradiação e a energia é transferida através de ondas eletromagnéticas. As ondas eletromagnéticas terão frequência(ν) diferente para cada faixa dentro do espectro eletromagnético (Griffiths, 1999), isso é mostrado na figura 3. O espectro é dividido em faixas e as frequências vão de zero a infinito. O sol emite em quase todos os comprimentos de onda, porém a maior parte de radiação emitida fica entre 0,3 e 15 μm , (Iqbal, 1983).

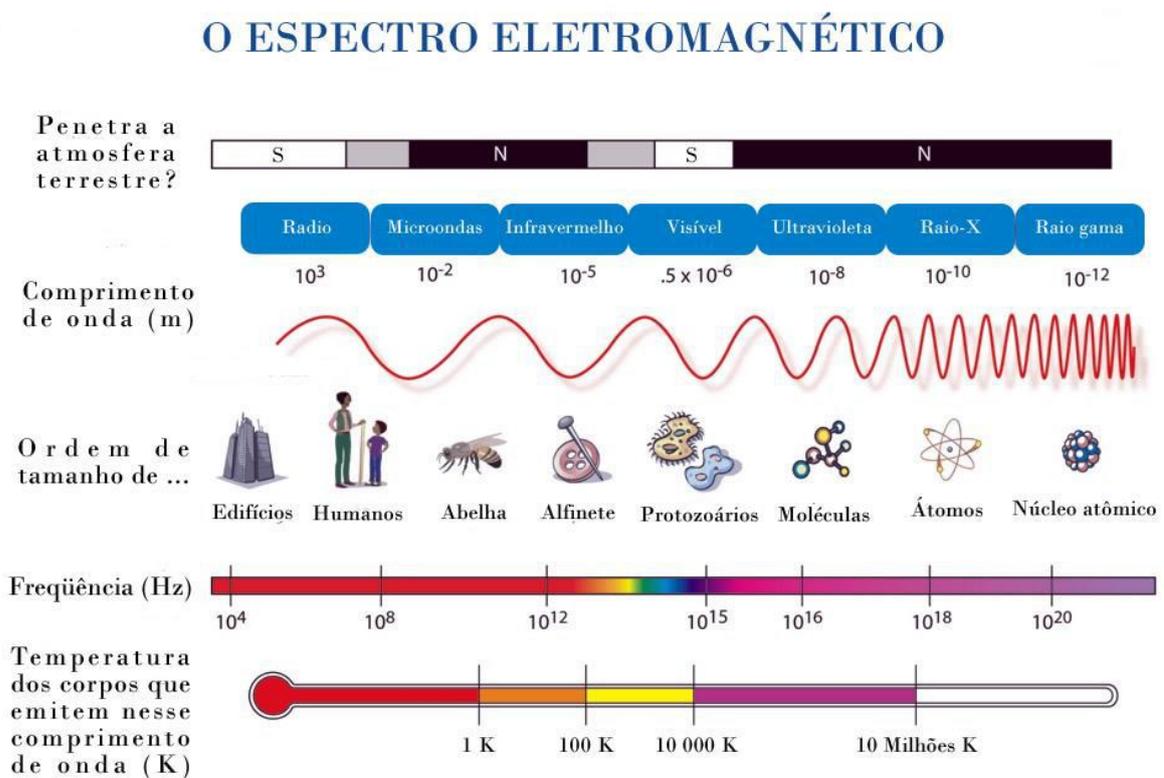


Figura 3: O espectro eletromagnético

Fonte: NASA data. Disponível em: [<my.nasadata.larc.nasa.gov/science-practices/electromagnetic-diagram/>](https://my.nasadata.larc.nasa.gov/science-practices/electromagnetic-diagram/)

Todos os tipos de corpos emitem radiação em alguma faixa do espectro eletromagnético. Um corpo negro é uma idealização de um corpo que absorve radiação e emite na mesma proporção que absorveu. Essa idealização é útil para estabelecer os fundamentos sobre a emissão de radiação, (Iqbal, 1983).

A teoria clássica diz que a intensidade da radiação cresce com uma potência de ν^3 . No entanto, a teoria não concordava com as evidências experimentais encontradas. As evidências mostravam que na verdade havia um pico de intensidade e depois ela volta a diminuir e não cresce indefinidamente resultando na catástrofe ultravioleta¹. Para resolver essa relação Max Planck postulou que a energia eletromagnética é emitida de forma discreta em porções que chamou de *quanta* e estabeleceu a lei da radiação de Planck, equação 1, (Young et al., 2009). A figura 4 mostra a função de Planck para três temperaturas diferentes, sendo a primeira $T=5273K$ que corresponde aproximadamente à temperatura da superfície do Sol.

$$I(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (1)$$

Onde I ($W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$) é a distribuição de intensidades para cada comprimento de onda λ , $h \cong 6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ é a constante de Planck, $c \cong 3 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$ é a velocidade da luz, $k \cong 1,38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ é a constante de Boltzmann e T é a temperatura.

Integrando toda a radiação existente (equação 2), obtém-se a lei de Stefan-Boltzmann, equação 3. Um corpo negro possui intensidade de energia proporcional à temperatura à quarta potência.

$$I = \int_0^{\infty} I(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$I = \sigma T^4 \quad (3)$$

Onde $\sigma = 5,6866 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ é a constante de Stefan-Boltzmann.

¹ Catástrofe ultravioleta: erro na teoria clássica sobre a radiação eletromagnética, que afirma que distribuição espectral da radiação térmica cresce indefinidamente para comprimentos de onda menores que $1,5 \mu m$ (Nussenzveig, 1998).

Obtendo-se o máximo da função da equação 1, chega-se na lei de Wien (equação 4), que estabelece que para obter maiores picos de emitância deve-se aumentar a temperatura como mostra a figura 4. O Sol possui, então, 99% da sua energia compreendida entre 0,25 e 4 μm (Iqbal, 1983).

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{a}{T} \quad (4)$$

Onde $a=2897,8 \mu\text{m}\cdot\text{K}$.

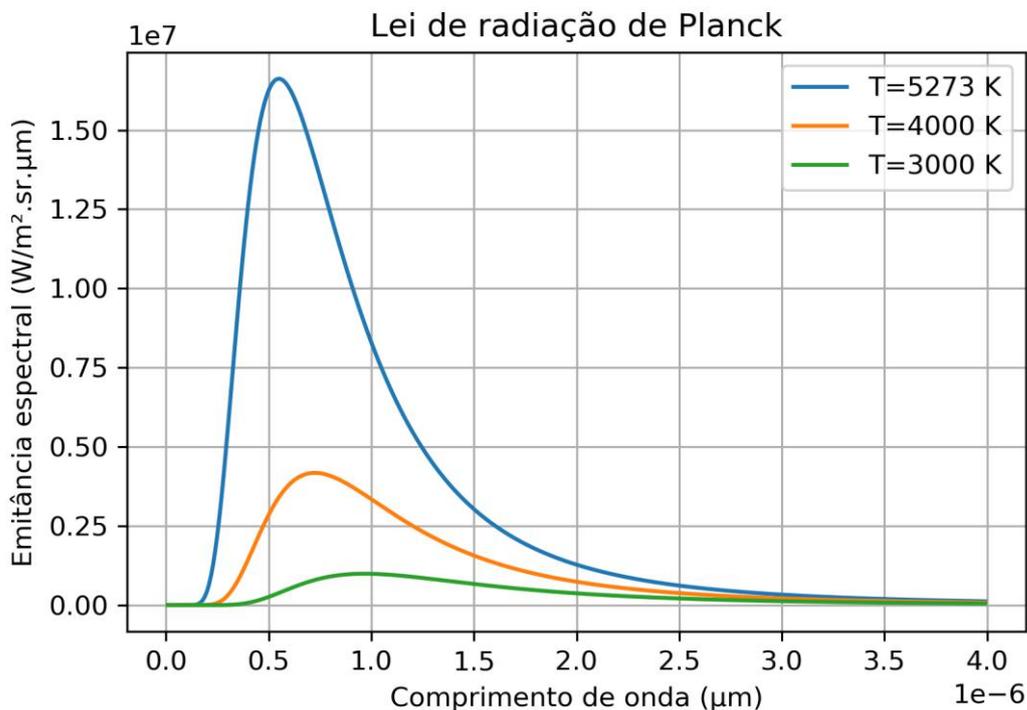


Figura 2 - Lei de Radiação de Planck.

2.1.3 A Constante Solar

A Constante Solar é a taxa de energia total em todos os comprimentos de onda incidentes por unidade de área, exposta perpendicularmente aos raios solares, à uma distância média entre a Terra e o Sol, (Iqbal, 1983). Segundo Thekaekara (1973 apud Iqbal, 1983) o valor da constante solar é aproximadamente 1367 W/m^2 . Este valor representa o total aproximado de radiação que chega no topo da atmosfera.

2.1.4 Irradiação extraterrestre em uma superfície horizontal

Quando um fluxo radiante incide sobre uma superfície formando um ângulo com a normal a esta superfície, a irradiância (I_0) será o produto da componente normal da irradiância (I_{0n})

que chegou a esta superfície pelo cosseno do ângulo de incidência (θ_z) (equação 5), (Iqbal, 1983). Quando o θ_z é pequeno a irradiância solar extraterrestre na superfície horizontal é maior. Isso significa que mais radiação chega na superfície quando a incidência está perpendicular a esta.

$$I_0 = I_{on} \cdot \cos \theta_z \quad (5)$$

2.1.5 Irradiância solar na superfície terrestre

Os constituintes presentes na atmosfera possuem frequência preferencial de interação com a radiação eletromagnética. Para isso, multiplica-se I_0 pela porção que é transmitida, ou seja, o coeficiente de transmissão (τ_λ) da atmosfera para um determinado, (equação 6), constituinte e comprimento de onda (Iqbal, 1983).

$$I_z = I_0 \cdot \tau_\lambda \quad (6)$$

Em que τ_λ é dado por:

$$\tau_\lambda = e^{-k_{i\lambda} \cdot m_i} \quad (7)$$

$k_{i\lambda}$ é o coeficiente de atenuação monocromática e m_i é o caminho ótico² percorrido no processo considerado.

Existem dois processos principais que atenuam a radiação solar que chega em superfície: o espalhamento e a absorção. O espalhamento ocorre quando a onda eletromagnética atinge uma partícula e então é espalhada em todas as direções. A absorção ocorre quando a partícula absorve a radiação que recebeu, para depois a energia adquirida ser transformada em outra forma de energia, (Iqbal, 1983).

Os componentes químicos e as partículas em suspensão existentes na atmosfera são responsáveis pelo espalhamento e absorção. Conforme a radiação chega na atmosfera ela vai sendo espalhada ou absorvida por esses componentes, (Varejão-Silva, 2005).

A figura 5 mostra a comparação entre a irradiância solar que chega no topo da atmosfera e como ela é atenuada devido à presença dos constituintes, vapor d'água, oxigênio e ozônio. O vapor d'água absorve em faixas do infravermelho, o oxigênio absorve em uma faixa no visível

² Caminho ótico: produto do índice de refração do meio pela distância percorrida por uma onda eletromagnética (Nussenzweig, 1998).

o ozônio absorve no ultravioleta. A representação da figura 3 no topo da atmosfera é maior do que na superfície. Tal fato se deve ao espalhamento e à absorção.

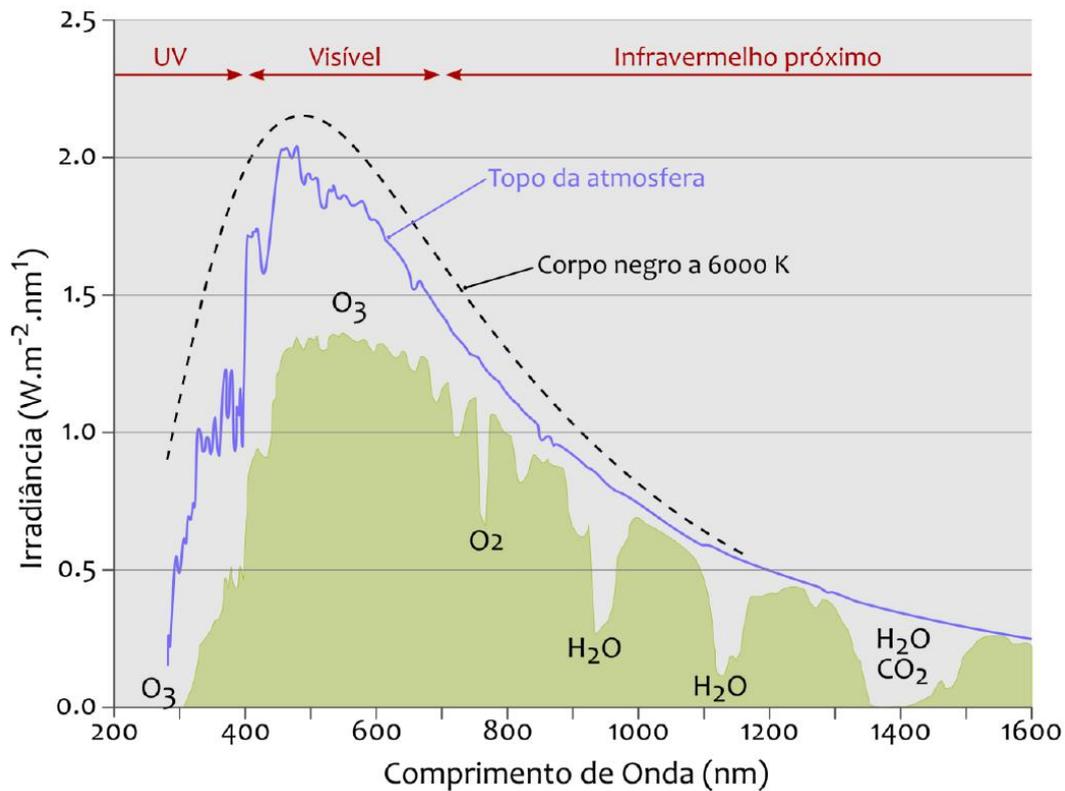


Figura 5 – Espectro eletromagnético da radiação solar e sua atenuação.

Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017.

2.1.6. Tipos de irradiância solar que incidem em superfície.

Em superfície, existem duas componentes da irradiância solar: a irradiância direta e a irradiância difusa. A irradiância direta é aquela que chega na superfície terrestre na mesma direção que chegou no topo da atmosfera, (Iqbal,1983). A difusa é a porção que chega em superfície depois da irradiância solar que chegou no topo da atmosfera sofrer atenuação por espalhamento, (Iqbal, 1983). A figura 6 mostra os dois tipos de irradiância (meramente ilustrativa).

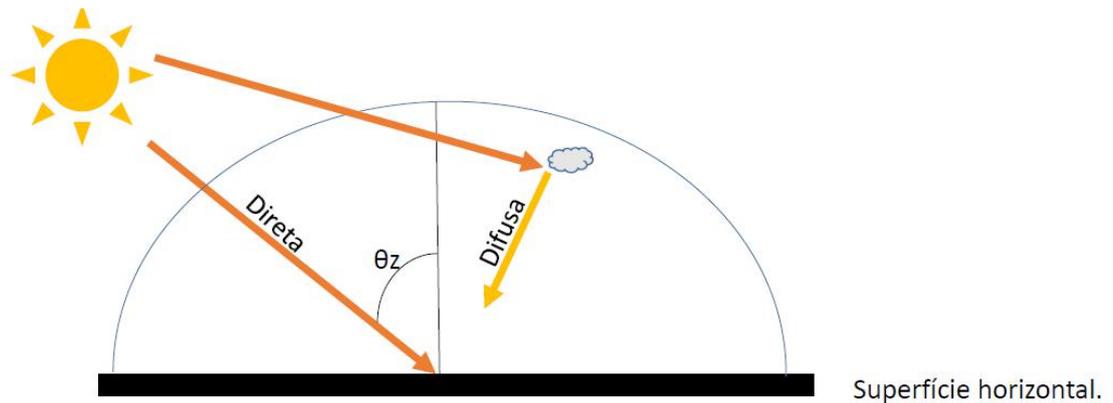


Figura 6 - Tipos de irradiação solar que incidem em superfície.

2.2 ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR

O Atlas Brasileiro de Energia Solar foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Foram utilizados dados meteorológicos da rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais), base de dados do INPE de recursos de energia solar e eólica no Brasil, e de estações meteorológicas automáticas em, além de imagens de satélites no período de 1999 a 2015. Para desenvolvê-lo foi utilizado o modelo físico BRASIL-SR para obtenção de estimativas da radiação solar incidente na superfície (Pereira, et al., 2017). O Atlas tem o objetivo de estabelecer uma base de dados para o planejamento do setor elétrico no Brasil, (Pereira, et al., 2017).

A nomenclatura proposta para os tipos de irradiação na atmosfera foi baseada na publicação de Duffie e Beckman (2013). Para este estudo, apenas a irradiação global horizontal é utilizada. Ela representa a taxa de energia total por unidade de área incidente em uma superfície horizontal, (Pereira, et al., 2017). A irradiação global horizontal é igual a irradiação direta mais a difusa, (Pereira, et al., 2017).

A metodologia para produzir uma estimativa de irradiação solar incidente em superfície consistiu de três etapas: tratamentos dos dados e imagens de satélite, aplicação do método de transferência radiativa e cálculo das componentes de irradiação, sendo que a utilizada como referência neste trabalho foi a irradiação solar global horizontal (Pereira, et al., 2017).

Os resultados obtidos por Pereira et al, 2017 serviram para gerar a espacialização da média mensal do total diário de irradiação solar global horizontal representado nas figuras 7 a 18 que correspondem aos meses do ano para o referente período.

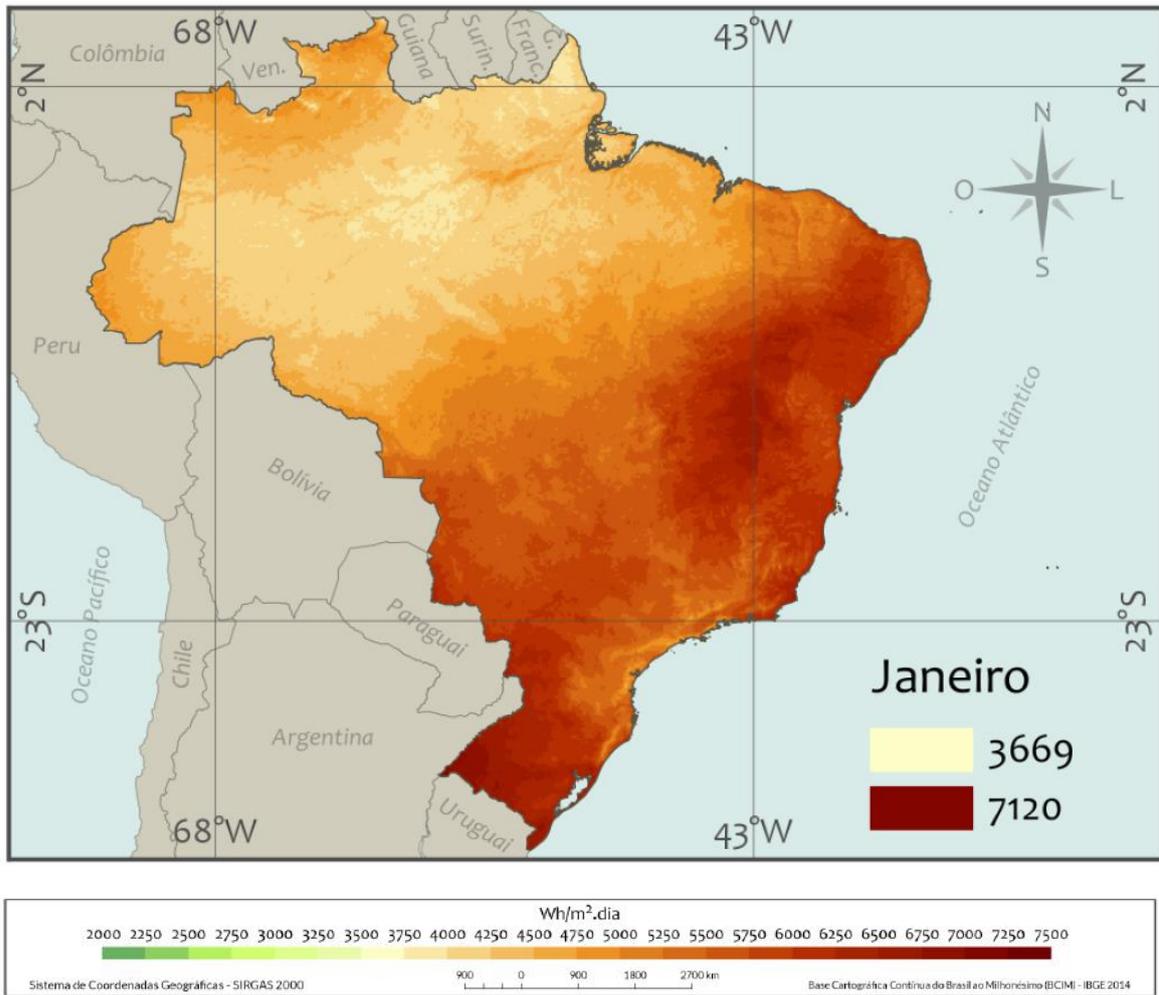


Figura 7 - Média mensal de 1999 a 2015 de janeiro do total diário de irradiação solar global horizontal.

Fonte: Adaptado do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

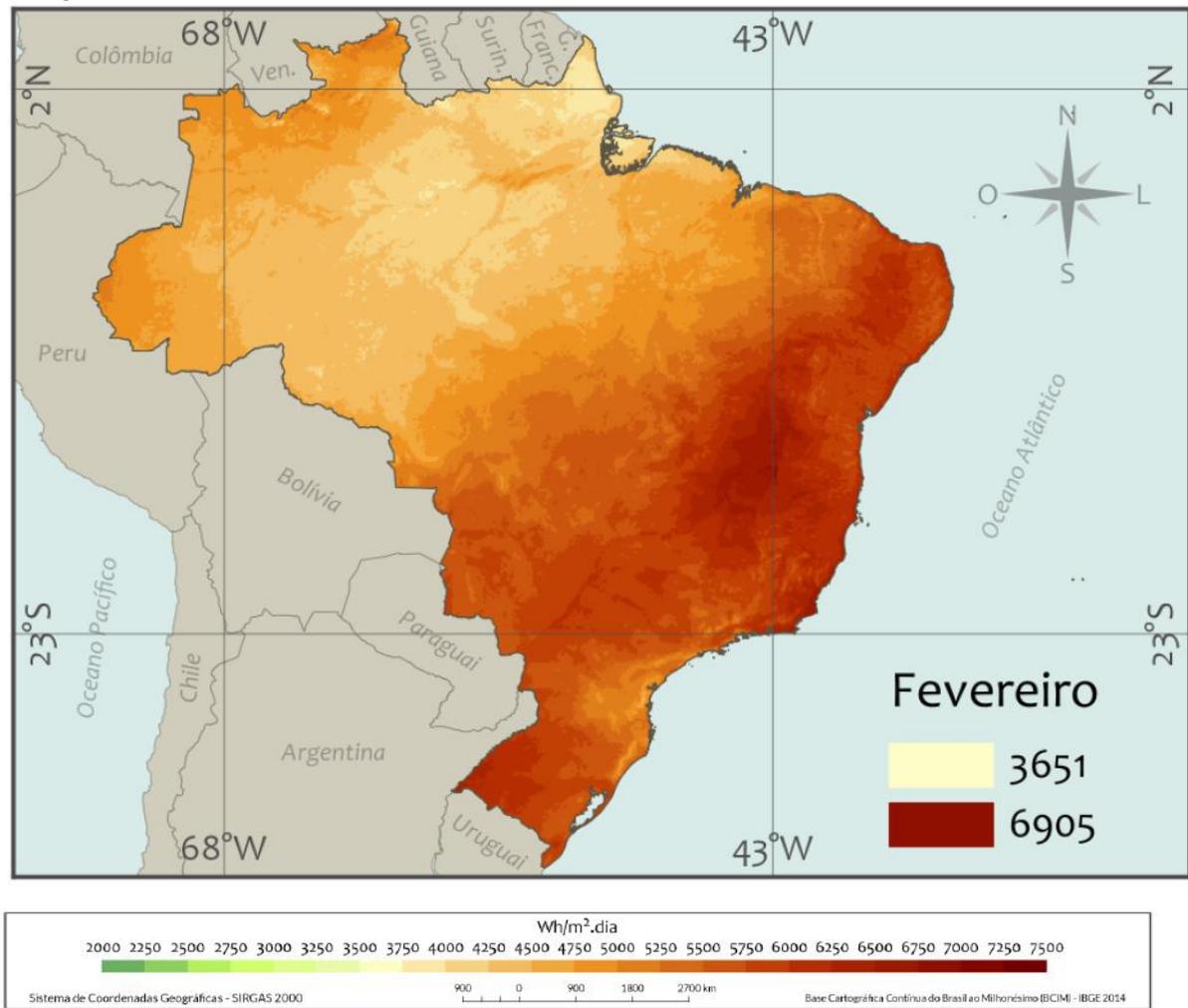


Figura 8 - Média mensal de 1999 a 2015 de fevereiro do total diário de irradiação solar global horizontal.

Fonte: Adaptado do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

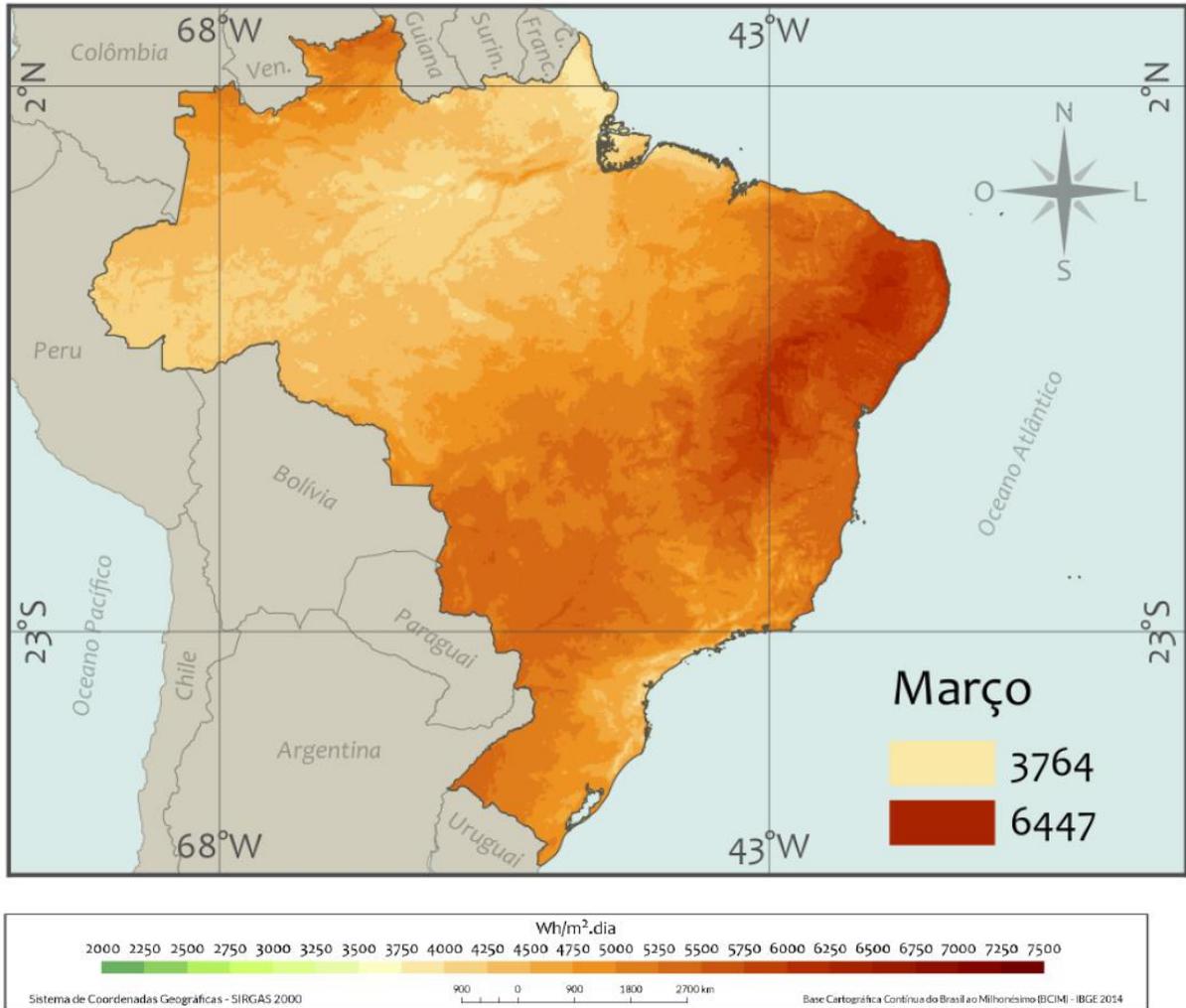


Figura 9 - Média mensal de 1999 a 2015 de março do total diário de irradiação solar global horizontal.

Fonte: Adaptado do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

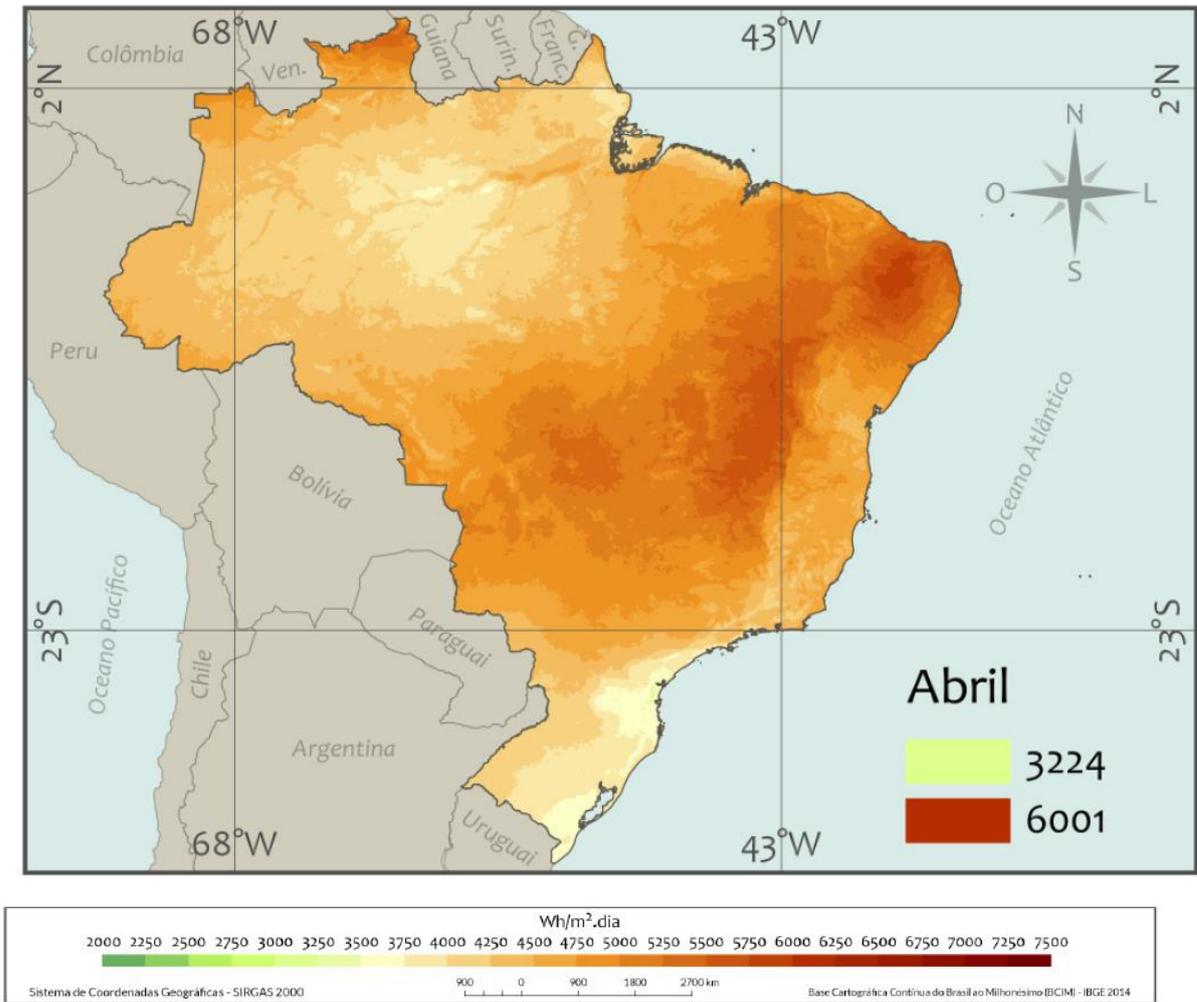


Figura 10 - Média mensal de 1999 a 2015 de abril do total diário de irradiação solar global horizontal.

Fonte: Adaptado do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

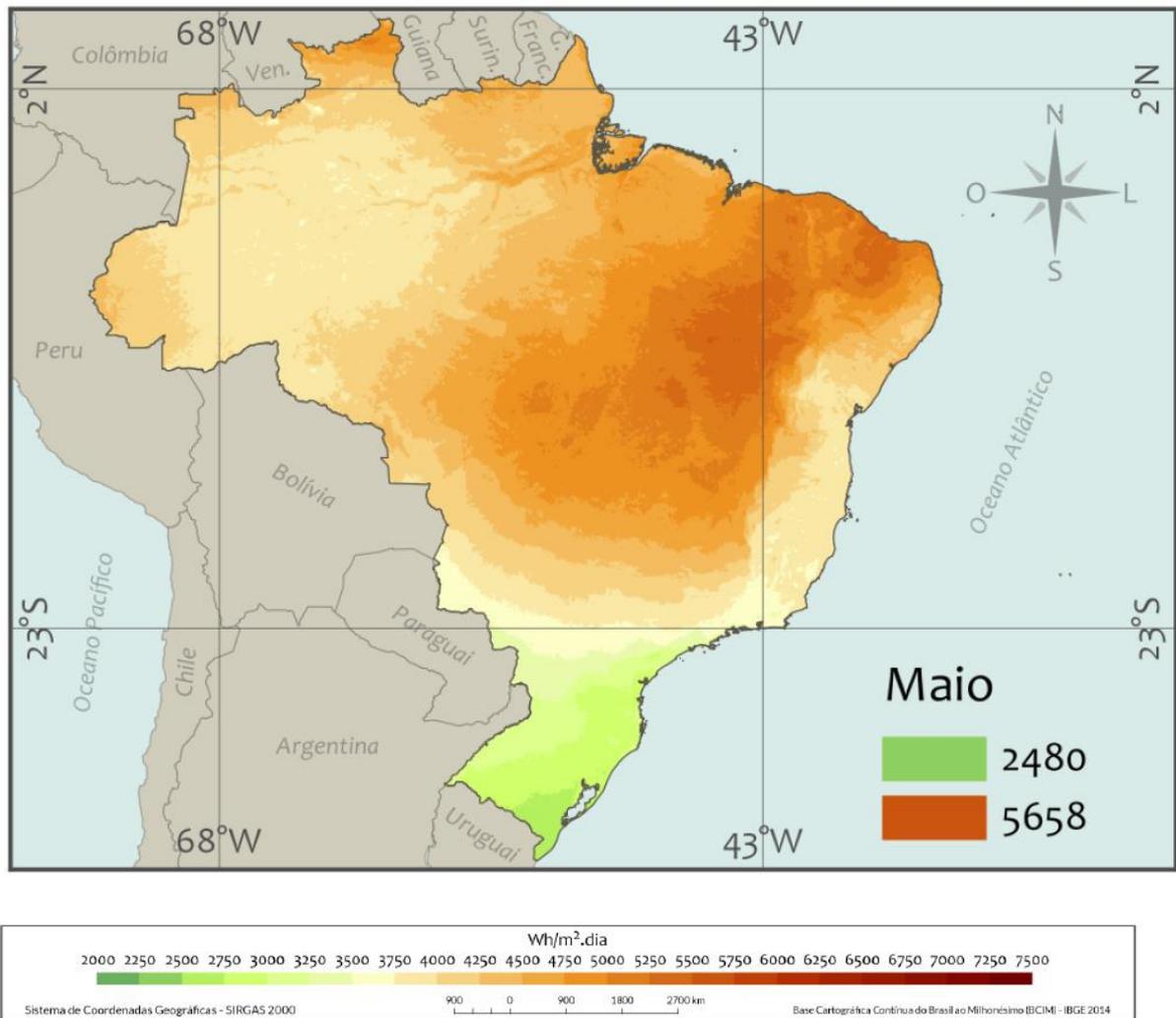


Figura 11 - Média mensal de 1999 a 2015 de maio do total diário de irradiação solar global horizontal.

Fonte: Adaptado do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

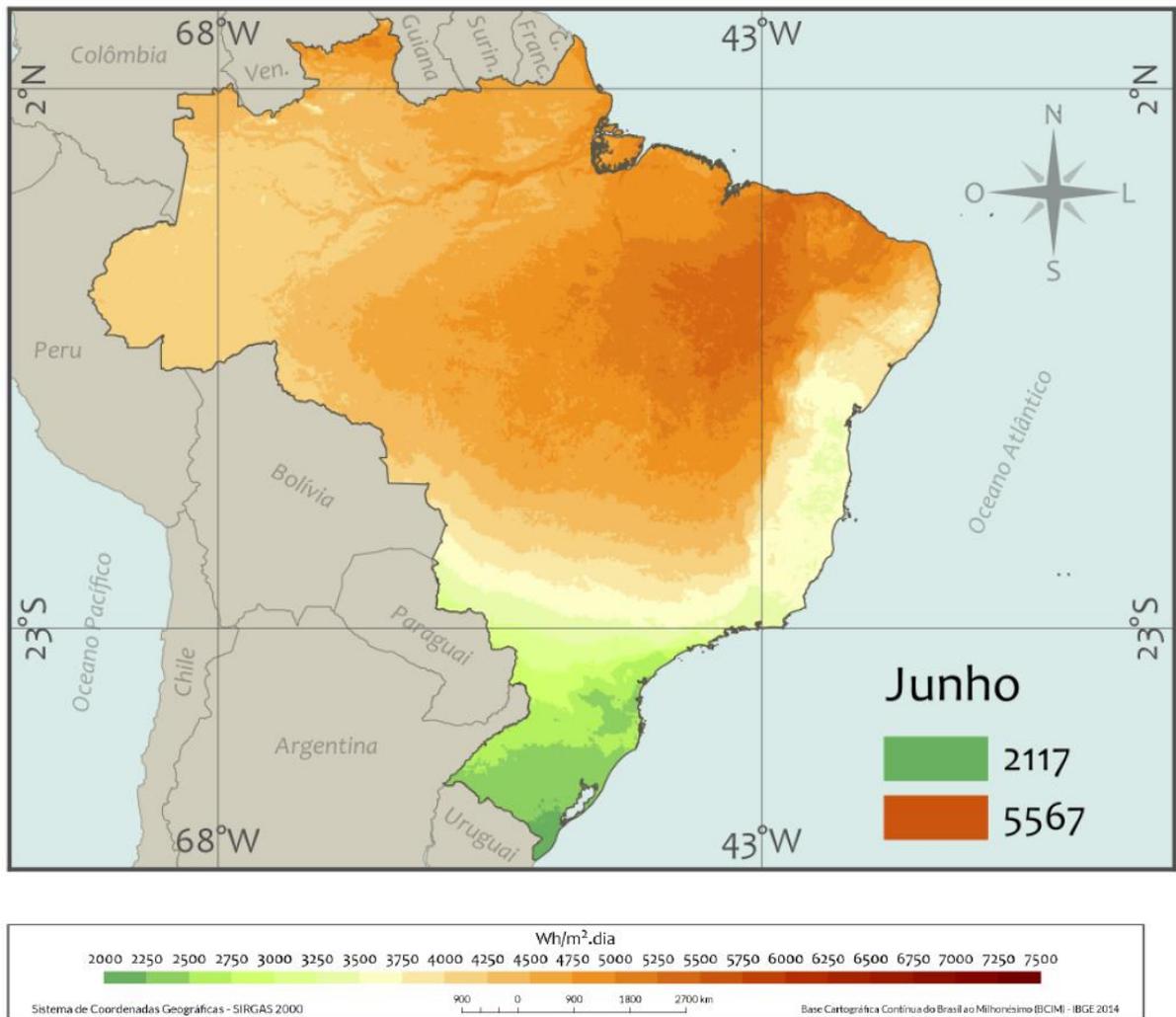


Figura 12 - Média mensal de 1999 a 2015 de junho do total diário de irradiação solar global horizontal.

Fonte: Adaptado do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

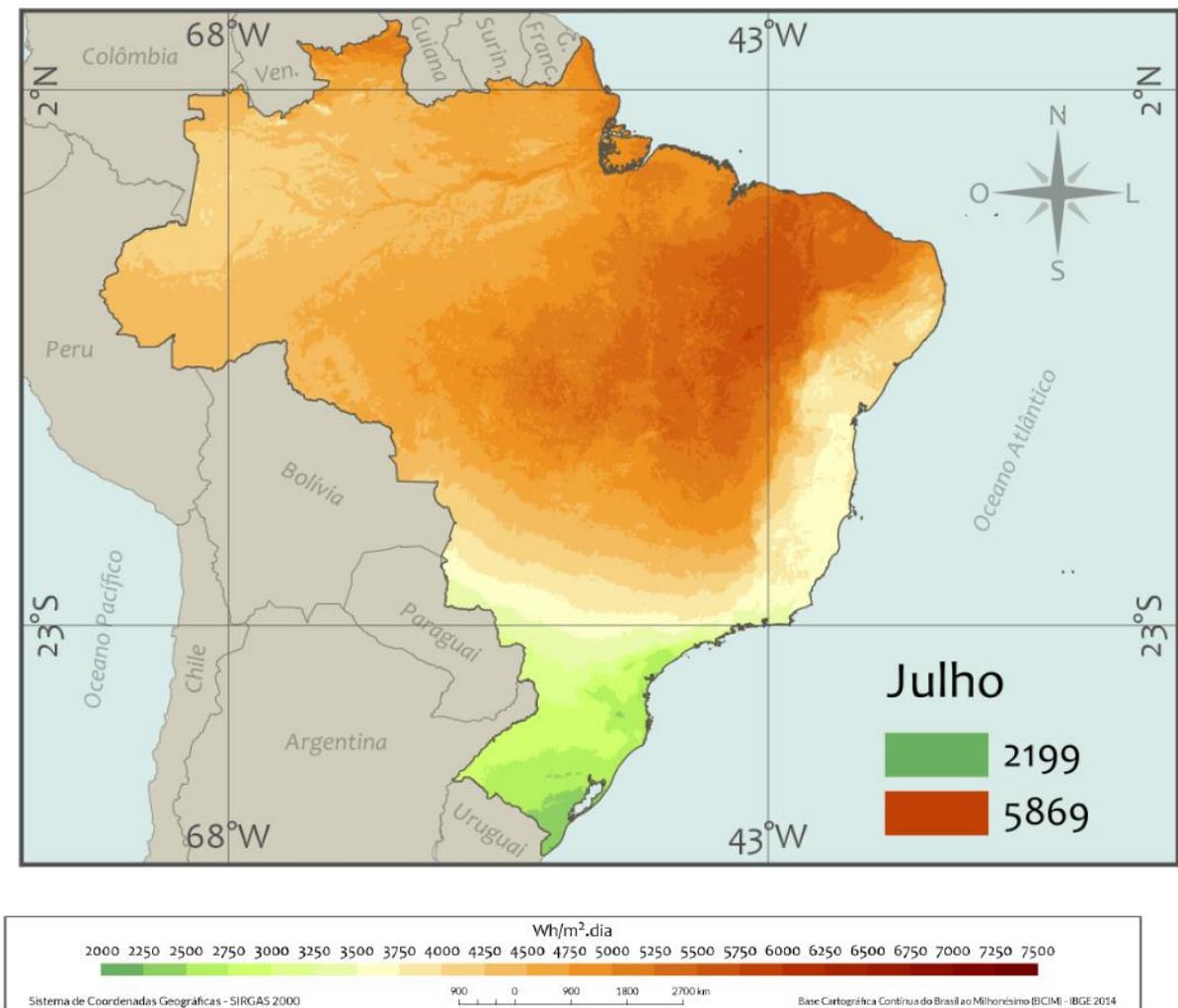


Figura 13 - Média mensal de 1999 a 2015 de julho do total diário de irradiação solar global horizontal.

Fonte: Adaptado do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

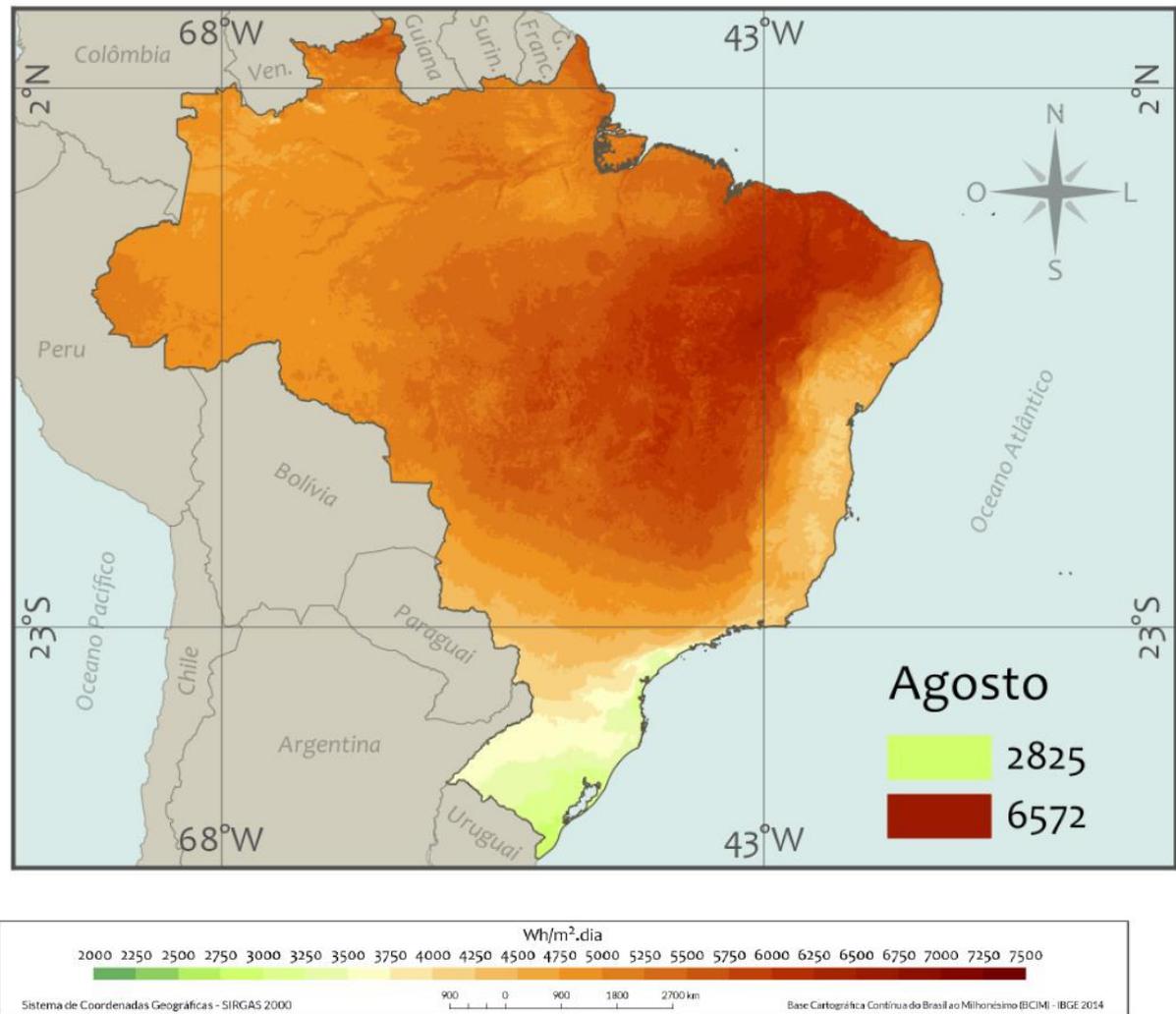


Figura 14 - Média mensal de 1999 a 2015 agosto do total diário de irradiação solar global horizontal.

Fonte: Adaptado do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

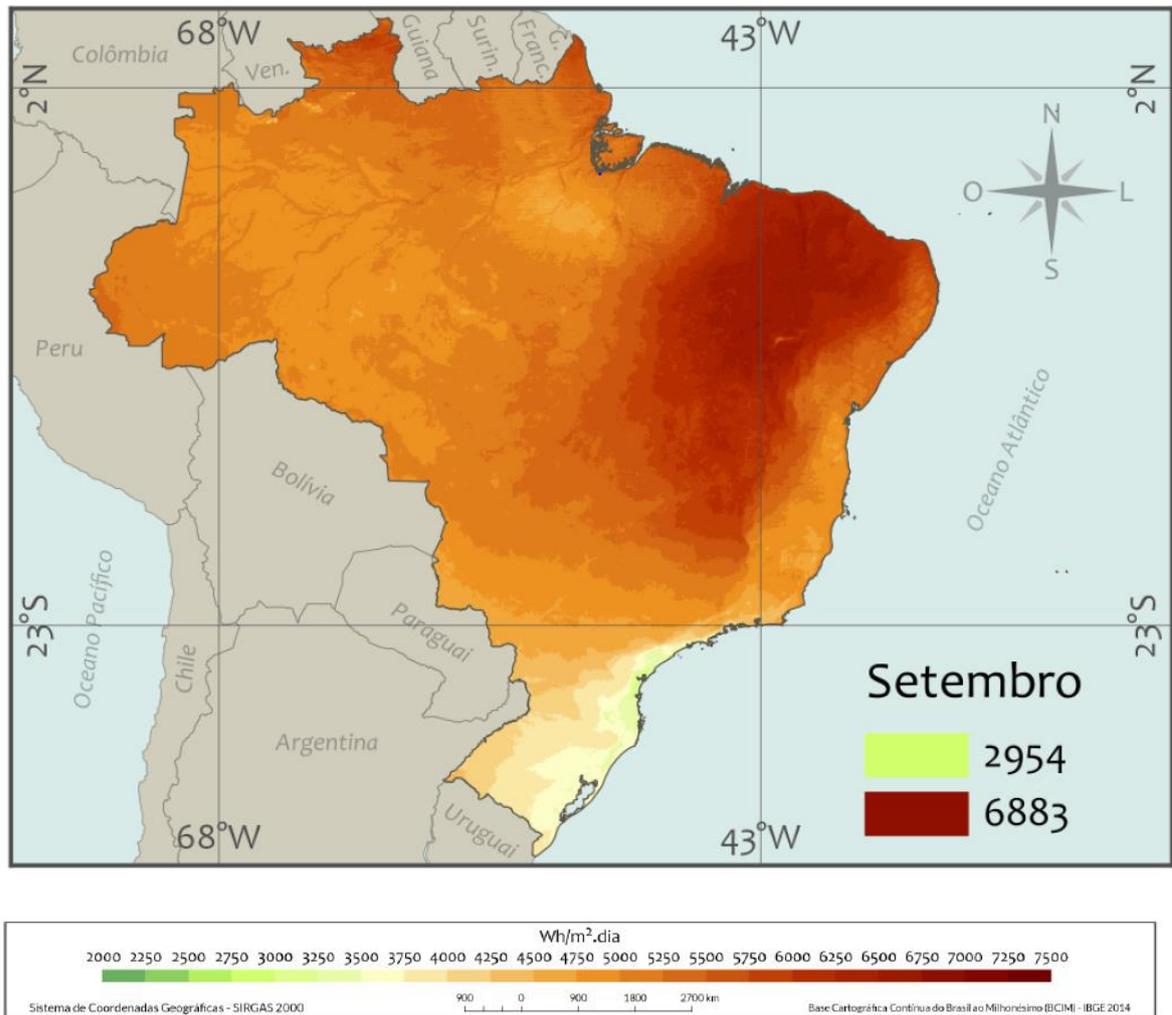


Figura 15 - Média mensal de 1999 a 2015 de setembro do total diário de irradiação solar global horizontal.

Fonte: Adaptado do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

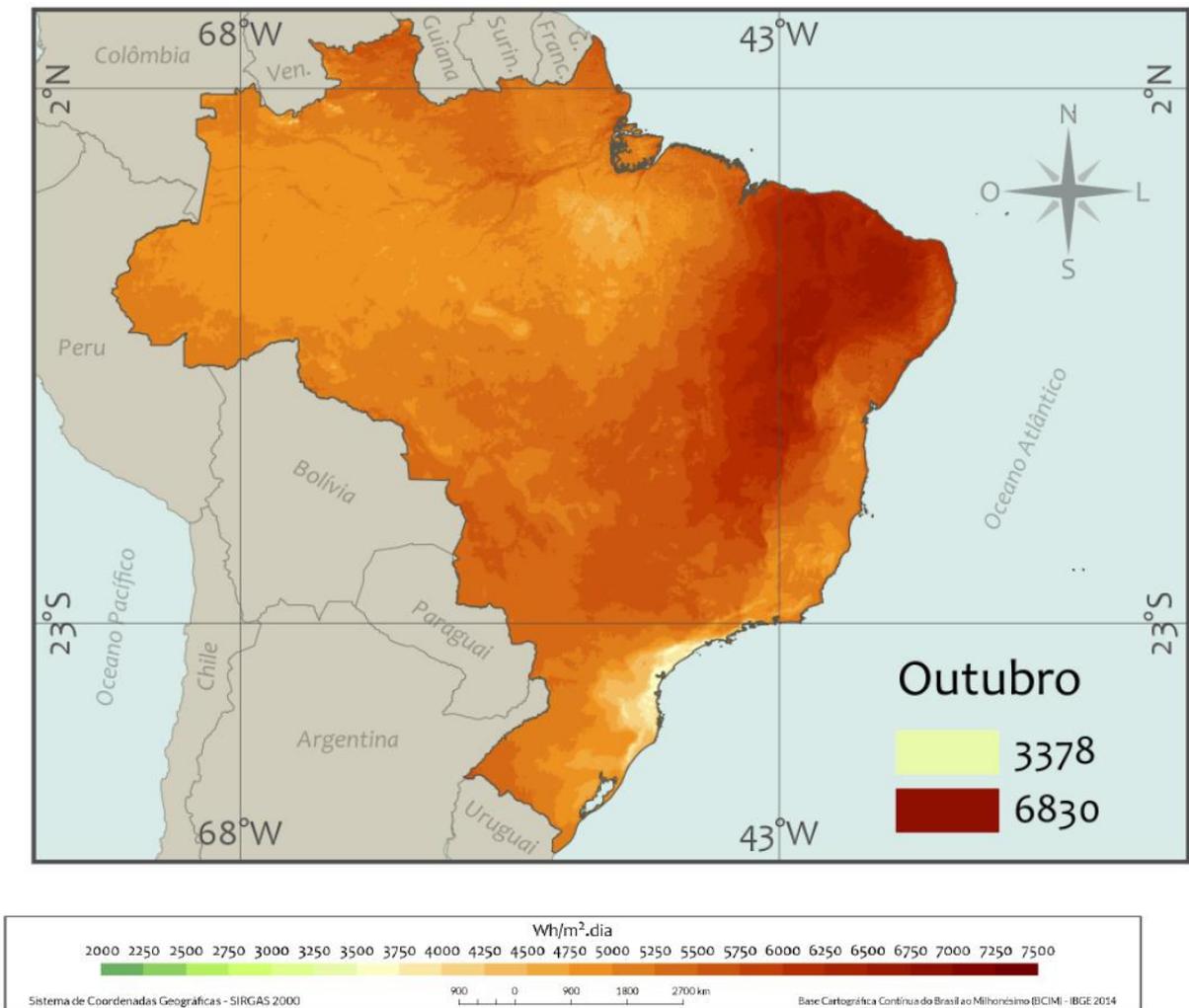


Figura 16 - Média mensal de 1999 a 2015 de outubro do total diário de irradiação solar global horizontal.

Fonte: Adaptado do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

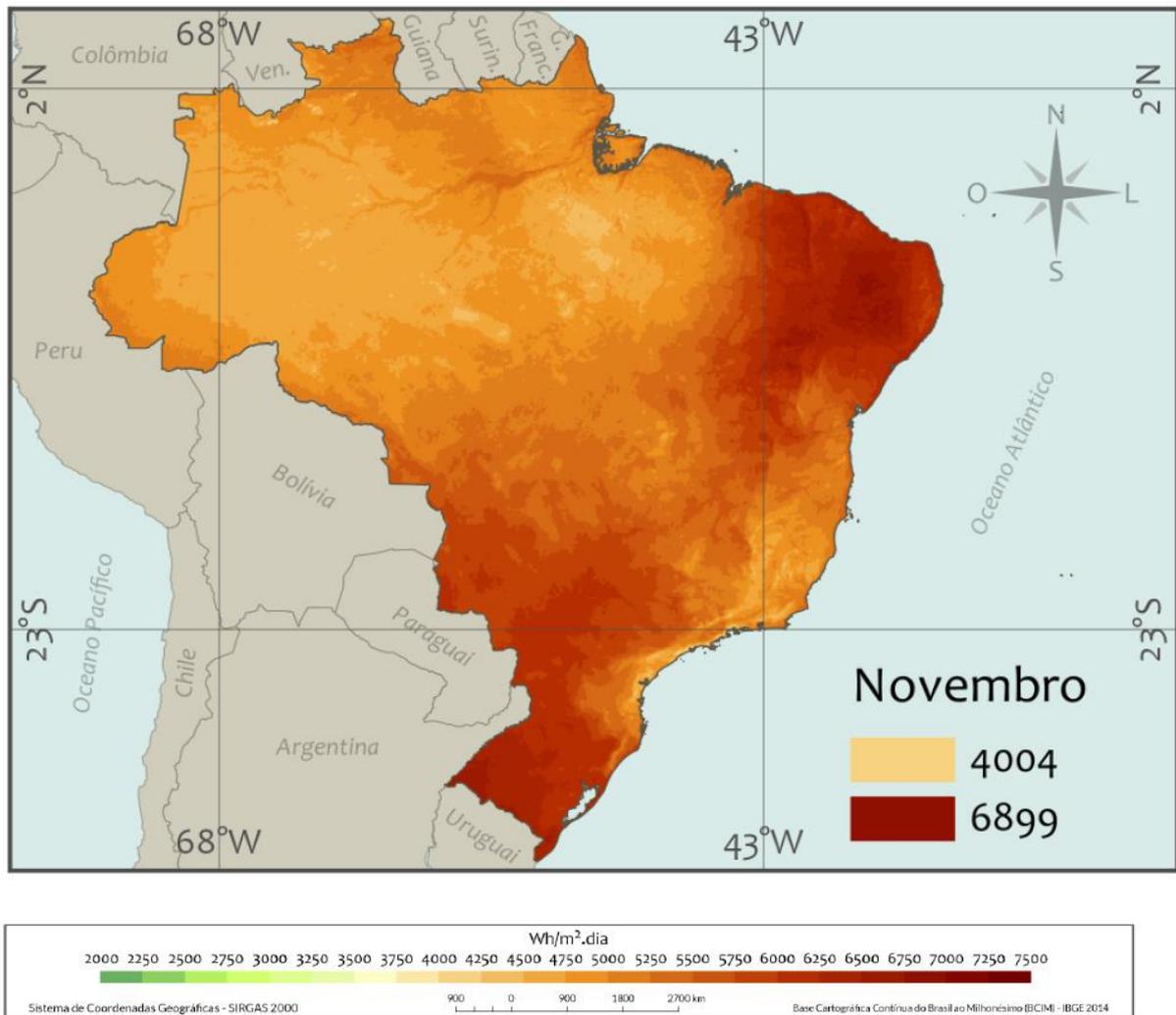


Figura 17 - Média mensal de 1999 a 2015 de novembro do total diário de irradiação solar global horizontal.

Fonte: Adaptado do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

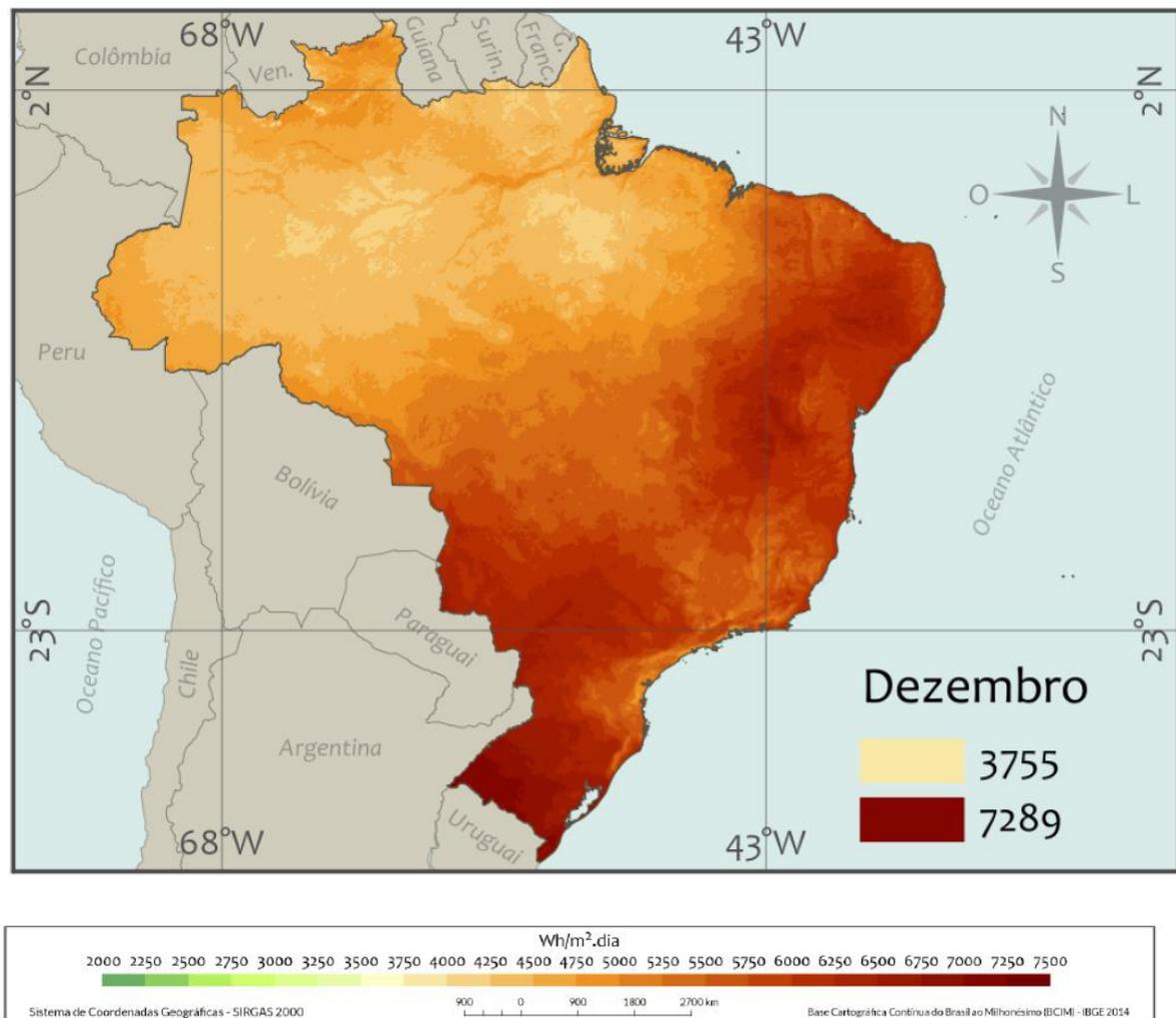


Figura 18 - Média mensal de 1999 a 2015 de dezembro do total diário de irradiação solar global horizontal.

Fonte: Adaptado do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

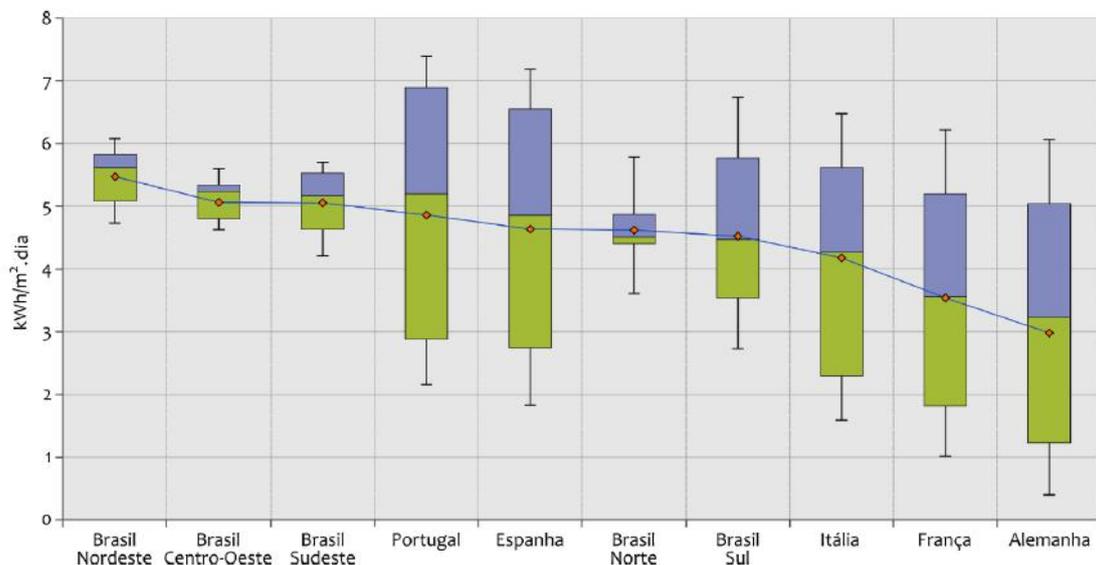
2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E SEU USO NO MUNDO

Células fotovoltaicas são dispositivos feitos de semi-condutores que são capazes de converter energia solar em energia elétrica. Na presença de luz ocorre o transporte de elétrons dentro do semicondutor e isso torna possível a passagem de corrente elétrica, (Carneiro, 2010). Para gerar 1 A (Ampère) de corrente elétrica é necessário 1000 W/m^2 de irradiância solar direta e que a temperatura do ar seja maior ou igual a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, (CRESESP, 2006).

Com relação ao uso da energia solar fotovoltaica no mundo, os países europeus são líderes, representando 65% da capacidade global de geração de energia solar (Dinçer, 2011). Os países que mais produzem esse tipo de energia na Europa são Espanha e Alemanha, sendo que a primeira gera entre $1,48$ e $3,56 \text{ kW.h.m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ (Dinçer, 2011).

A figura 19, mostra o potencial de irradiância solar global horizontal, por dia, nas regiões do Brasil, e em outros países, em *box-plot*, onde as caixas representam 50% dos dados, a linha central representa a mediana, o losango vermelho é a média encontrada e as linhas externas os valores máximos e mínimos. O Brasil apresenta altos valores de irradiação solar por dia e que varia pouco sazonalmente já que se suas caixas possuem larguras menores. A região Nordeste apresenta irradiação solar média mensal grande, mostrando o alto potencial energético que o país possui. A região Sudeste também possui irradiação solar média mensal elevada e indica que possui potencial para geração de energia solar. Portugal e Espanha apresentam maiores máximos, seguidos de Itália, França e Alemanha. Embora possuam altos valores de irradiação, as caixas possuem alturas elevadas e isso indica que há maior variabilidade anual. Portanto a captação de energia solar não é constante.

A menor média anual de irradiância solar dentre os países europeus foi da Alemanha com $3,0 \text{ kW.h.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. As maior parte das regiões brasileiras apresentaram valores superiores a esse e valores próximos ao país de maior irradiância que foi Portugal com, aproximadamente, $4,9 \text{ kW.h.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.



Fonte: Photovoltaic Geographical Information System. Disponível em: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmmaps/eur.htm> apud (Pereira et al., 2017)

Figura 19 – Comparativo das médias da irradiação global horizontal no Brasil e em alguns países da Europa ($\text{kW.h.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)

3. METODOLOGIA

3.1. DADOS UTILIZADOS

Os dados utilizados foram medidos por um Piranômetro do tipo termopilha e registrados com um intervalo de tempo de 10 minutos pelo *datalogger* da Plataforma de Coleta de Dados (PCD) instalada na Estação Meteorológica da Ilha do Fundão em fevereiro de 2016. Os dados usados no estudo são de Irradiância Solar Global Horizontal medidos em $W.m^{-2}$ do ano de 2017. Nesse local, também se situa o Laboratório de Agrometeorologia e Sustentabilidade do Departamento de Meteorologia da UFRJ cuja posição geográfica é $22^{\circ}51'26.1''S$, $43^{\circ}14'07.2''W$, figura 20. Tal localização fica compreendida, aproximadamente, na linha de $23^{\circ}S$ e $43^{\circ}W$ nas imagens do Atlas Brasileiro de Energia solar.

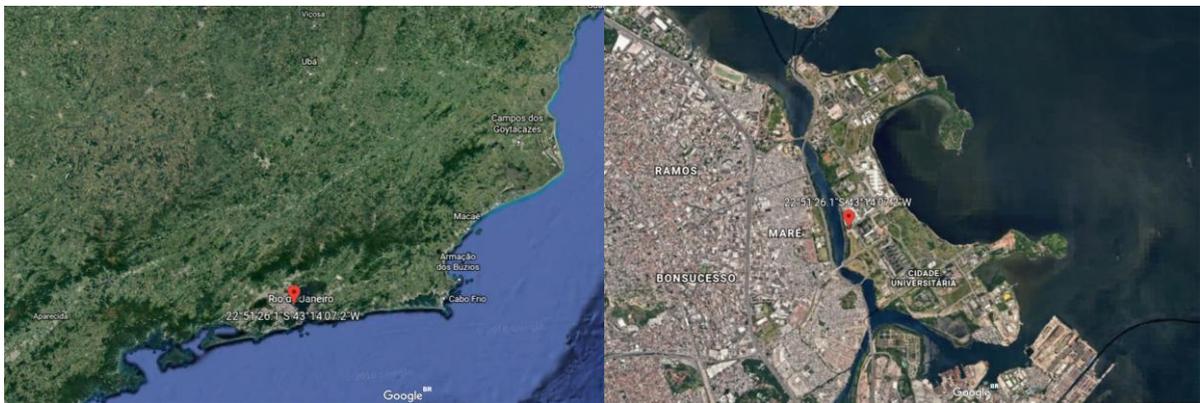


Figura 20– Localização da Estação Meteorológica da Ilha do Fundão.

Fonte: Google Earth. Disponível em: <https://earth.google.com/web/@-22.85617224,-43.21806044,1.59672268a,5935.17130741d,35y,0.07439173h,1.26172496t,0r/data=CjsaORIXCgAZj_zBwHPbNsAh8Ief_x6eRcAqGzIywrA1MScyNi4xIIMgNDPCsDE0JzA3LjLiVxgBIAEoAg>

3.2 MÉTODOS

Para obter os dados de irradiância solar incidente em superfície. Deve-se fazer a integral da Irradiância Solar Global Horizontal, R_g , medida de 10 em 10 minutos em relação ao tempo, onde t_0 é o instante de tempo onde o Sol começa a incidir e t é o instante final.

Para fins de geração de energia deve ser em $kW.h.m^{-2}$, o cálculo do total de Irradiância Solar Global Horizontal Incidente na superfície. Para tanto basta fazer a integral:

$$\int_{t_0}^t Rg dt \text{ em } \left[\frac{kW.h}{m^2} \right] \quad (8)$$

Em que,

Rg é a Irradiância Solar Global Horizontal Incidente na Superfície a cada 10 minutos em $W.m^{-2}$;

dt é igual a 10 minutos que é igual a $1/6$ de hora.

Na prática, a integração pode ser substituída por um somatório do dado intervalo de tempo correspondente ao dia de medição, equação 9.

$$\int_{t_0}^t Rg dt = \frac{1}{6} \sum_{t_0}^t Rg \text{ em } \left[\frac{kW.h}{m^2} \right] \quad (9)$$

Com os resultados obtidos, foi feito o cálculo do total diário somando as medições da PCD de cada dia de medição. Com o que foi adquirido anteriormente calculou-se o total mensal. Em seguida, foi feita a média mensal com os totais diários de Irradiância Solar Global Horizontal Incidente.

4. RESULTADOS

Utilizando a metodologia com os dados da PCD, durante o ano de 2017, obteve-se os resultados de Irradiância Solar Global Horizontal Diária na Ilha do Fundão. Com esses dados foram calculadas quatro métricas estatísticas: total mensal, média mensal, máximo mensal e mínimo mensal.

O total mensal, figura 21, mostra que o mês de janeiro foi o de maior irradiância em superfície, com $201,69 \text{ kW.h.m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. O mês com menor total mensal foi junho com $102,31 \text{ kW.h.m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, figura 17.

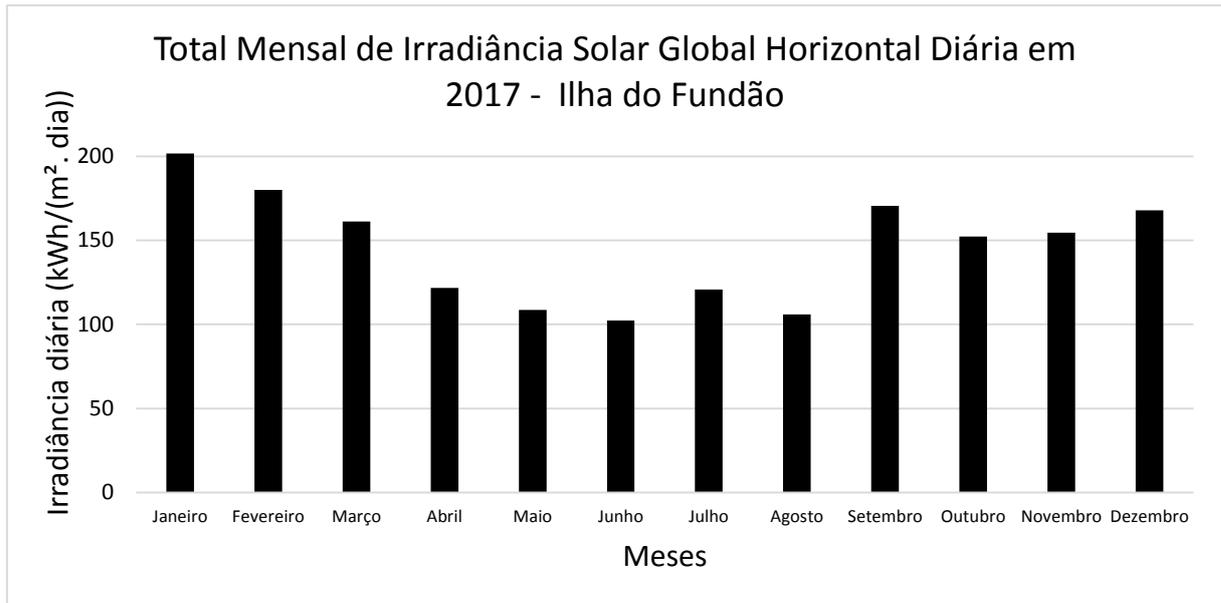


Figura 21 - Total Mensal de Irradiância Solar Global Horizontal Diária em 2017 - Ilha do Fundão.

A média mensal, figura 22, mostra o padrão esperado de acordo com as relações astronômicas para cada mês, com máximos durante o verão e mínimos durante o inverno. O mês de dezembro com $5,42 \text{ kW.h.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, janeiro com $6,51 \text{ kW.h.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$; julho com $3,89 \text{ kW.h.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e agosto com $3,4 \text{ kW.h.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. A menor média mensal foi do mês de maio com $3,31 \text{ kW.h.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ que é superior a média anual da Alemanha ($3,0 \text{ kW.h.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$).

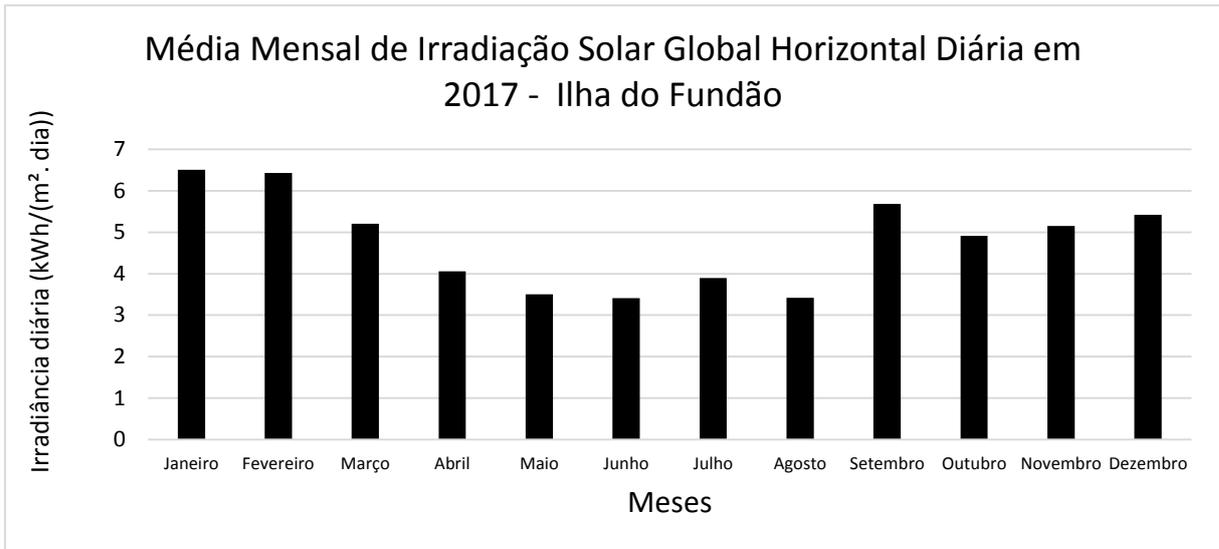


Figura 22 - Média Mensal de Irradiância Solar Global Horizontal Diária em 2017 - Ilha do Fundão.

O máximo mensal foi maior no mês de dezembro, figura 23, com $13,61 \text{ kW.h.m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ e o mês de menor máximo foi em junho com $5,87 \text{ kW.h.m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. O valor de mínimo mensal, figura 24, confirma o que já foi mencionado por conta das estações do ano, os menores mínimos são no inverno e mínimos maiores no verão. O mês de maio apresentou o menor mínimo com $0,46 \text{ kW.h.m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ e janeiro o maior mínimo com $2,04 \text{ kW.h.m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$.

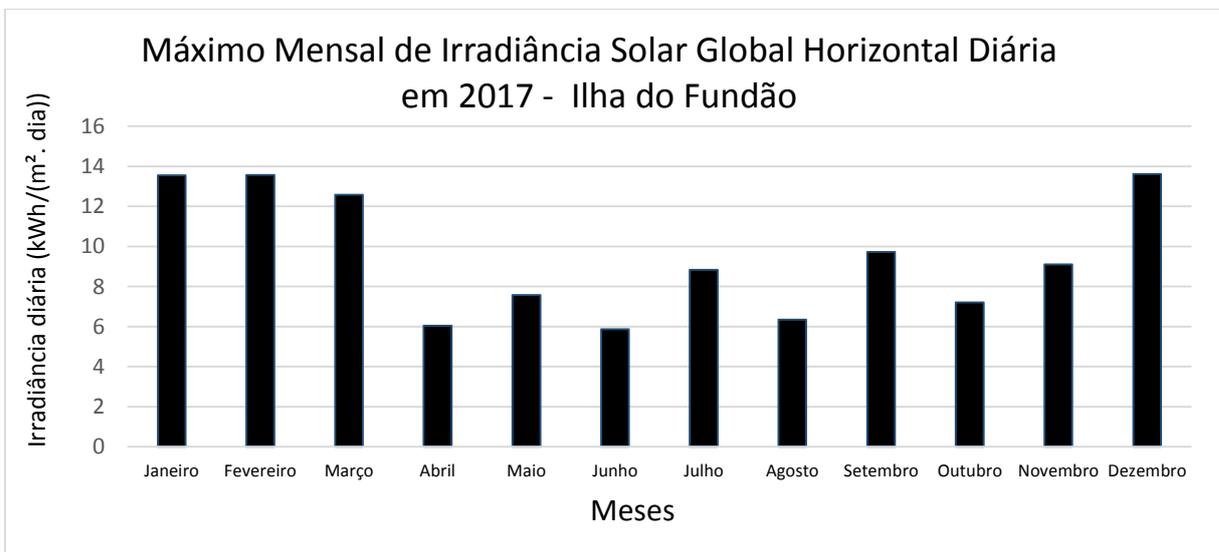


Figura 23 - Máximo Mensal de Irradiância Solar Global Horizontal Diária em 2017 - Ilha do Fundão.

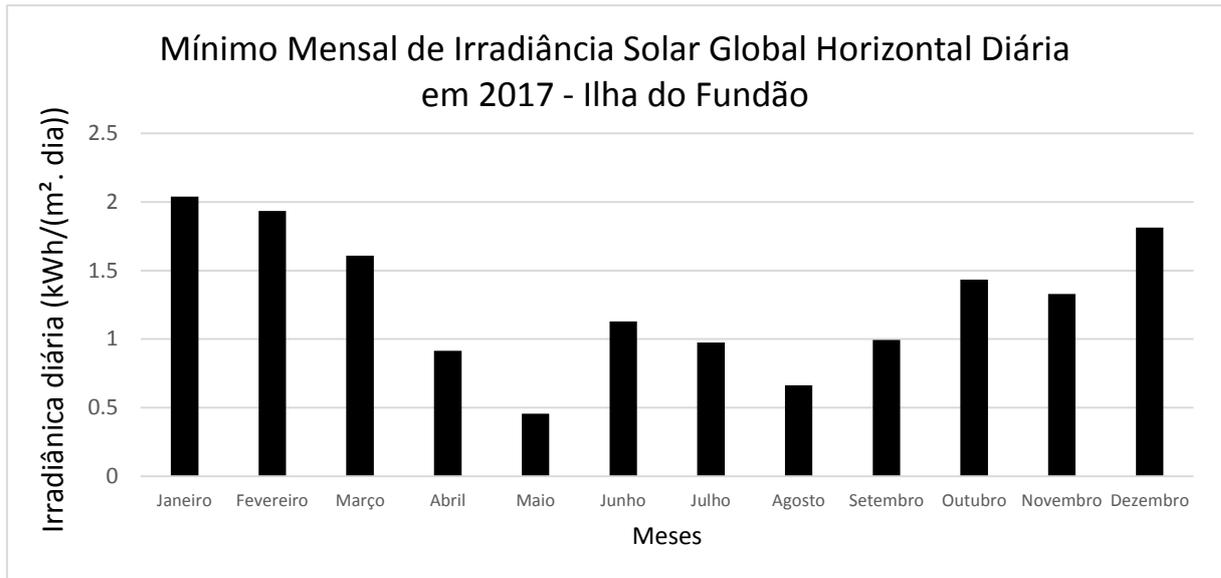


Figura 24 - Mínimo Mensal de Irradiância Solar Global Horizontal Diária em 2017 - Ilha do Fundão.

Comparando-se os resultados obtidos na figura 22 com os valores apresentados nas especializações do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al., 2017) que obteve as médias mensais do total diário de irradiação solar global horizontal para o período de 1999 a 2015, tem-se que os valores médios mensais obtidos por medições na Estação Meteorológica da Ilha do Fundão concordam com os do Atlas. Pela tabela 1 observam-se os respectivos valores médios mensais medidos na Ilha do Fundão e obtidos pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al., 2017).

Tabela 1 – Médias mensais do total diário de irradiância solar global horizontal medidos na Ilha do Fundão e obtidos pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar.

Mês	Valor Medido na Ilha do Fundão para o ano de 2017 (kW.h.m⁻². dia⁻¹)	Valor obtido pelo Atlas para o período de 1999 a 2015 (kW.h.m⁻². dia⁻¹)
Janeiro	6,51	De 6 a 7 (figura 7)
Fevereiro	6,43	De 6 a 7 (figura 8)
Março	5,2	De 5 a 6 (figura 9)
Abril	4,06	De 4 a 5 (figura 10)
Mai	3,31	De 3 a 4 (figura 11)
Junho	3,41	De 3 a 4 (figura 12)
Julho	3,89	De 3 a 4 (figura 13)
Agosto	3,42	De 3 a 4 (figura 14)
Setembro	5,69	De 5 a 6 (figura 15)
Outubro	4,91	De 4 a 5 (figura 16)
Novembro	5,15	De 5 a 6 (figura 17)
Dezembro	5,42	De 5 a 6 (figura 18)
Média Anual (2017)	4,78	-

A tabela 2 mostra irradiação solar global horizontal média para cada região do Brasil segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar(Pereira et al., 2017) e as médias mensais de 2017 da estação meteorológica da Ilha do Fundão. A região Sudeste possui irradiação solar global horizontal média(de 1999 a 2015) igual a 4,951 kW.h.m⁻². dia⁻¹. Como a raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM) é igual a 0,416 kW.h.m⁻². dia⁻¹, o valor medido na Estação Meteorológica da Ilha do Fundão, 4,78 kW.h.m⁻². dia⁻¹, é compatível com o Atlas Brasileiro de Energia Solar.

Tabela 2 – Média anual dos totais diários de irradiação global horizontal para cada região brasileira.

Região	Irradiância Global Horizontal Média (de 1999 a 2015) Observada (kW.h.m⁻² . dia⁻¹)	REQM (kW.h.m⁻² dia⁻¹)
Norte	4,825	0,467
Nordeste	5,483	0,456
Centro-oeste	5,082	0,421
Sudeste	4,951	0,416
Sul	4,444	0,395
Médio	5,153	0,421

Fonte: Adaptado do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al., 2017).

A média para o ano de 2017 da irradiância solar global horizontal foi de 4,78 kW.h.m⁻². dia⁻¹, mostrado na tabela 1, indica que a localidade da Estação Meteorológica da Ilha do Fundão possuiu um alto potencial para geração de energia solar. Comparando esse resultado com outros países, como mostrado na figura 19, a localidade da estação, em 2017, apresentou potencial igual ou superior à média anual dos países que mais geram esse tipo de energia na Europa (Alemanha = 3,0 kW.h.m⁻². dia⁻¹; França = 3,5 kW.h.m⁻². dia⁻¹; Itália = 4,2 kW.h.m⁻². dia⁻¹; Espanha = 4,8 kW.h.m⁻². dia⁻¹; Portugal = 4,9 kW.h.m⁻². dia⁻¹). Isso significa que a média de irradiância solar global horizontal de 2017 fica entre o primeiro e o segundo maiores potenciais europeus.

Com relação ao resultado do Atlas para a região Sudeste, é notável que o valor do potencial na região é superior ao de Portugal, país de maior potencial na Europa. Os estados do Sudeste possuem potencial de energia solar elevado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos pelas medições na PCD mostraram concordância com o esperado para as estações do ano, ou seja, maiores valores de irradiância solar global horizontal diária nos meses de verão e menores valores para o inverno.

Os dados medidos pela PCD em 2017, na Ilha do Fundão, foram equivalentes ao que foi obtido pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar para as médias mensais do total diário de irradiância solar global horizontal em superfície para o período de 1999 a 2015.

O resultado da média anual de irradiação solar global horizontal, medido em 2017, também foi compatível com a média entre 1999 e 2015 calculada pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar para a região Sudeste. Tal valor é superior à segunda maior média anual dos países europeus que fazem maior uso da fonte de energia.

A estação apresentou um valor médio anual da irradiação solar global horizontal diária comparável ao de países europeus que utilizam, tradicionalmente, essa fonte de energia. Sendo que, o menor valor mensal de $3,31 \text{ kW.h.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (maio) é superior à média anual da Alemanha ($3,0 \text{ kW.h.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$).

Através dos resultados do Atlas, de 1999 a 2015, foi possível concluir que a região Sudeste apresentou irradiância global horizontal média anual maior que Portugal, país de maior irradiância dentre os países da Europa.

Por fim, pode-se afirmar que a região Sudeste apresenta um potencial de energia solar eficiente para gerar esse tipo de energia, levando em conta a irradiância solar global horizontal, embora não seja a região de maior irradiância solar horizontal no país. Consequentemente, com média do período do presente estudo compatível à média para a região sudeste, a estação meteorológica da Ilha do Fundão na UFRJ também possui potencial para este tipo de geração de energia.

REFERÊNCIAS

1. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Capacidade de Geração no Brasil. BIG - Banco de Informações de Geração**. 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 24 fev. 2018.
2. CARNEIRO, J. **Semicondutores : modelo matemático da célula fotovoltaica**. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16960/1/Semicondutores_Modelo%2520matem%25C3%25A1tico%2520da%2520c%25C3%25A9lula%2520fotovoltaica.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2018.
3. CRESESB. **Energia solar princípios e aplicações**. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>. Acesso em: 24 de fev. 2018.
4. DINÇER, F. **The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries in solar energy**. Elsevier, 2011.
5. EMPRESA DE PESQUISA ELÉTRICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://antigo.epe.gov.br//AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>>. Acesso em: 24 fev. 2018.

6. GRIFFITHS, D. J. **Introduction to Electrodynamics**. 3rd ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1999.
7. IQBAL, M. **An Introduction to Solar Radiation**. 1ª ed. Academic Press, 1983.
8. NASA EARTH OBSERVATORY. **Aerosols and Incoming Sunlight (Direct Effects)**.
Disponível em: <<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Aerosols/page3.php>>. Acesso em: 25 fev. 2018.
9. NEJAT, P. et al. **A global review of energy consumption, CO2 emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO2emitting countries)**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 43, p. 843–862, 2015.
10. NUSSENZVEIG, M. H. **Curso de Física Básica vol. 4**. 1ª edição ed. São Paulo: Blucher, 1998.
11. OLIVEIRA, G. R. **A Crise da Água na Região Metropolitana de São Paulo em 2014 e a Ineficiente Gestão dos Recursos Hídricos**. CES Revista, v. 29, n. 1, p. 5–20, 2015.
12. PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2017. v. 2ª edição. São José dos Campos – São Paulo.
13. VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife. 2005.
14. YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A.; FORD, L. A. **Física IV: Ótica e física moderna**. 12ª ed. São Paulo: Pearson Education do brasil, 2009.