



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DE TELHADOS
(DIREÇÕES E INCLINAÇÕES) NO DESEMPENHO DE SISTEMAS
DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.**

Driely de Souza Jesse

Relatório Final de Iniciação Científica
orientado pelo pelo pesquisador André
Rodrigues Gonçalves e coorientado pelo
Prof. Dr. Fernando Ramos Martins

INPE

São José dos Campos

2021



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DE TELHADOS
(DIREÇÕES E INCLINAÇÕES) NO DESEMPENHO DE SISTEMAS
DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.**

Driely de Souza Jesse

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientado pelo
pesquisador André Rodrigues Gonçalves
e coorientado pelo Prof. Dr. Fernando
Ramos Martins

INPE

São José dos Campos

2021

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”

-Isaac Newton, 1676

AGRADECIMENTOS

É com grande satisfação que dedico este trabalho as seguintes pessoas:

Primordialmente, aos meus Jesses. Ao longo desse processo foram os meus gigantes, que me levantaram alto para que eu pudesse ver mais longe. Minha base fundamental, que me amparou e muitas vezes acreditou mais em mim do que eu mesma, me mostrando que este é só o começo de muitas das minhas futuras realizações. Este trabalho é inteiramente para cada um de vocês: GlauCIA, Ricardo, Renato e claro, Rodolfo.

A minha mãe e família caçara, que me acolheu e me fez filha, cuidou de mim e me apoiou como uma verdadeira família faz. Obrigado por ser minha grande inspiração e por estar ao meu lado todos esses anos, seu apoio e amor foram imprescindíveis.

Aos meus orientadores, que me guiaram ao decorrer desse percurso com grande maestria, tanto com críticas construtivas, como por elogios, se demonstraram grandes profissionais e acima de tudo grandes amigos.

E claro, ao Lucas, por me transmitir um pouco da sua paz, por ser meu melhor amigo e minha família. Lar é qualquer lugar que eu estiver contigo.

Deus. Obrigado.

RESUMO

A geração fotovoltaica de eletricidade mostra um crescimento consistente nos últimos anos. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) o Brasil ultrapassou a marca de 7,0 GW de potência instalados em 2020. No entanto a incerteza do rendimento na geração de módulos FV em telhados pode impactar na quantidade de energia entregue à rede de distribuição de eletricidade. O desenvolvimento deste estudo pode dar suporte ao crescimento da participação da energia solar na matriz energética nacional, sem prejudicar a qualidade e a segurança do sistema elétrico do país. Esta pesquisa foi iniciada pelo ex-bolsista José Antônio Teixeira Filho e posteriormente substituída pela graduanda Driely de Souza Jesse em Março/2021. Este trabalho está sendo executado em cooperação entre o Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Universidade Federal de São Paulo, utilizando a base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar com 17 anos de imagens de satélite. O objetivo deste projeto é avaliar a perda de eficiência na geração de energia fotovoltaica referente à orientação e inclinação de telhados. O primeiro passo é o desenvolvimento de um código numérico para estimativa da irradiação global em plano inclinado, com objetivo de avaliar a contribuição das componentes direta e difusa da radiação solar. O segundo passo é a estimativa da irradiação solar considerando a anisotropia, e por fim, gerar os gráficos em coordenadas polares para radiação incidente em diferentes orientações e inclinações da superfície inclinada. A pesquisa está se consolidando conforme há familiaridade com a ferramenta já disponível em linguagem python. A primeira etapa está em andamento e possibilitou a geração de um analema solar junto aos cálculos de variáveis solares. Espera-se que esta pesquisa ajude a compreender a disponibilidade de energia solar para a geração distribuída e dar suporte para o desenvolvimento de projetos que alcancem o máximo desempenho possível na geração, diminuindo assim o custo final da energia fotovoltaica produzida e o tempo de retorno do investimento realizado.

Palavra-chave: Energia Solar; Modelagem numérica; Séries Temporais

ABSTRACT

Photovoltaic electricity generation shows consistent growth in recent years. According to the Brazilian Association of Photovoltaic Solar Energy (ABSOLAR) in Brazil, it surpassed the 7.0 GW mark of installed power in 2020. However, uncertainty in the yield in the generation of PV modules on roofs can impact the amount of energy delivered to the electricity distribution network. The study development can support the growth of the participation of solar energy in the national energy matrix, without harming the quality and safety of the country's electrical system. This research was carried out by former fellow José Antônio Teixeira Filho and later replaced by graduate student Driely de Souza Jesse in March / 2021. This work is being conducted in cooperation between the Laboratory of Modeling and Studies of Renewable Energy Resources of the National Institute of Space Research (INPE) and the Federal University of São Paulo, using a database of the Brazilian Atlas of Solar Energy with 17 years of satellite images. The aim of the project is to evaluate the loss of efficiency in photovoltaic energy generation regarding the orientation and inclination of roofs. The first step is the development of a numerical code for estimating global irradiation in an inclined plane, with the objective of evaluating the contribution of the direct and diffuse components of solar radiation. The second step is to estimate the solar irradiation considering an anisotropy, and finally, generate the graphs in polar coordinates for incident radiation in different orientations and inclinations of the inclined surface. The research is consolidating conformant there is familiarity with the tool already available in python language. The first stage is underway and enabled the generation of a solar analemma together with solar calculations. It is expected that this research will help to understand the availability of solar energy for distributed generation and provide support for the development of projects that achieve the maximum possible performance in generation, thus reducing the final cost of energy and time-voltage from the retuzo produced.

Keyword: Solar Energy; Numerical modeling; Time Series

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Mapa do potencial de geração solar fotovoltaica em termos do rendimento energético anual para todo o Brasil (medido em kWh/kWp.ano no perfil de cores), admitindo uma taxa de desempenho de 80% para geradores fotovoltaicos fixos e distribuição da população brasileira nas cidades. (Origem: Atlas Brasileiro de Energia Solar)11
- Figura 2.** Porto Alegre: gráfico anual de irradiação global , em todas as inclinações e azimutes. (Fonte: Cronemberger,2012).....17
- Figura 3.** Diagrama solar gerado a partir da biblioteca pvlib. Fonte: autoral.....23
- Figura 4.** Gráfico do modelo de dia de céu claro de Ineichen demonstrando a variação das componentes solares (irradiância global, direta e difusa) durante o dia. Fonte: autoral.....26
- Figura 5.** Gráfico comparativo de cada componente solar (irradiância global, direta e difusa) em relação à altitudesolar. Fonte: autoral.....26
- Figura 6.** Gráfico comparando os dados de irradiância observados com aqueles esperados pelo modelo de dia de céu claro de Ineichen. Fonte: autoral.....27
- Figura 7.** Gráfico do modelo de dia de céu claro. Avalia se está o céu está claro (1) ou encoberto (0) durante as horas do dia. Fonte: autoral.....27

SUMÁRIO

RESUMO	3
1. INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVO GERAL E JUSTIFICATIVA	11
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	13
2. DESENVOLVIMENTO.....	13
2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1.1 ENERGIA VINDA DO SOL	13
2.1.2 CONCEITOS BÁSICOS	14
2.1.3 MODELO DE CÉU CLARO.....	16
2.2 DADOS E METODOLOGIA.....	16
2.3 RESULTADOS PARCIAIS	18
3. CONCLUSÃO	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30

1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para prover a energia necessária ao desenvolvimento humano. Questões fundamentais como orientação e ângulos de inclinação do gerador fotovoltaico são importantes para maximizar o uso da irradiância solar disponível. (PINHO, 2014; FERREIRA, 1993; GALDINO, 2002)

Quando se fala em energia, deve-se lembrar de que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na Terra. (IQBAL, 1983) É a partir da energia do Sol que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita o represamento e a consequente geração de eletricidade (hidroeletricidade). A radiação solar induz a circulação atmosférica causando os ventos, Assim, também a energia eólica, já que os ventos se formam a partir da conversão da radiação solar em energia cinética. (EPE, 2012) Petróleo, carvão e gás natural foram gerados a partir de resíduos de plantas e animais que originalmente obtiveram do recurso solar a energia necessária ao seu desenvolvimento. E também, é através da energia do Sol que a matéria orgânica, como a cana-de-açúcar, realiza a fotossíntese e se desenvolve para, posteriormente, ser transformada em combustível nas usinas. (BANOS, 2011; NASA, 2021; IQBAL, 1983; YUAN, 2012)

Além da manutenção da temperatura ideal e da vida no planeta Terra, a energia solar contém outros processos para sua aplicação energética. Alguns aparelhos podem gerar energia quando iluminados pela luz do sol, por meio da instalação de placas de captação solar, existem alguns postes de iluminação e irrigadores que funcionam por este mecanismo. Também, dentre as principais aplicações da energia solar, podemos citar o aquecimento de água utilizando o próprio calor do sol por meio de geradores solares, outra possibilidade é converter a luz do sol em energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos. (EPE, 2012)

O mercado global de energia solar fotovoltaica é atualmente um dos maiores desenvolvedores de soluções e novas tecnologias que colaboram com a qualidade de vida das pessoas, ampliam a competitividade nas empresas e, principalmente, geram emprego e renda para as populações. Entretanto, a energia fotovoltaica tem seus gargalos ligados ao seu armazenamento e também as condições meteorológicas, principalmente em razão da variabilidade temporal e espacial de nebulosidade. Uma das questões pouco discutida é a influência que a direção e a orientação do telhado pode impactar nas perdas energéticas recebidas por painéis fotovoltaicos. (PEREIRA et al, 2017)

A norma regulamentadora imposta para construções civis instrui que a inclinação mínima para qualquer telhado é de 25% se tornando uma questão particular de cada região. Em relação a orientação, o ideal para maximizar a irradiação incidente de painéis solares fotovoltaicos é a direção Norte. Isso tendo em vista que, no hemisfério Sul, o Sol ocupa a porção Norte do hemisfério celeste na maior parte do ano. Para painéis fotovoltaicos o ideal é o ângulo de inclinação ser maior ao ângulo da Latitude local. A direção do painel solar tem uma grande importância na captação de energia, de modo que utiliza-lo corretamente pode cumprir retorno financeiro mais rápido, além de aumentar o desempenho do painel solar. (AZAREDO, 1997; MITIDIERI, 1994)

Entretanto, o Brasil se encontra em estado inicial na adoção de energia solar, uma de suas características mais importantes para este cenário é estar localizado em uma região de baixa latitude com alta disponibilidade e uniformidade de radiação solar, como mostra a figura 1. O objetivo deste trabalho é analisar as possibilidades de aproveitamento do potencial solar buscando avaliar como a orientação de telhados em direções e inclinações variadas influência no desempenho de sistemas de geração fotovoltaica. (BENEDITO, 2009; MARTINS, 2008a; MARTINS,2008b; WWF, 2015)

Espera-se que este trabalho possa contribuir para melhor compreender a disponibilidade de energia solar para a geração distribuída nacional e para isso, propomos a seguinte pergunta: Qual a influência da orientação e inclinação de telhados no desempenho da geração de energia solar fotovoltaica?

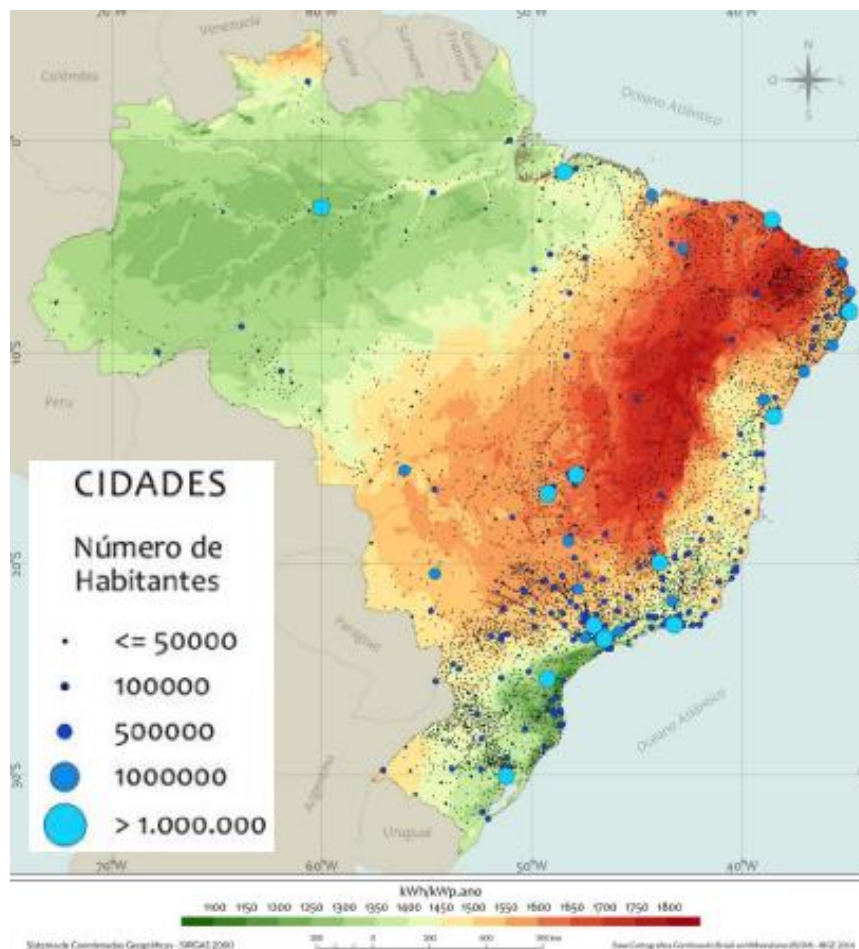


Figura 1. Mapa do potencial de geração solar fotovoltaica em termos do rendimento energético anual para todo o Brasil (medido em kWh/kWp.ano no perfil de cores), admitindo uma taxa de desempenho de 80% para geradores fotovoltaicos fixos e distribuição da população brasileira nas cidades. (Origem: Atlas Brasileiro de Energia Solar)

1.1 OBJETIVO GERAL E JUSTIFICATIVA

O Atlas Brasileiro de Energia Solar indica elevada incidência solar em todo território com a presença de um cinturão solar que percorre todo o nordeste, centro-oeste e porção norte e oeste do sudeste do país. O documento aponta também que a variabilidade temporal do recurso solar nacional é menor do que a observada nos países em que o mercado de geração fotovoltaica distribuída está consolidado.

Uma das barreiras encontradas pela geração fotovoltaica está intrinsecamente relacionada às condições meteorológicas, principalmente em razão da variabilidade temporal e espacial de nebulosidade. O desenvolvimento de estudos e a disponibilização de informações cientificamente embasadas pode dar suporte ao crescimento da participação da energia solar na matriz energética nacional sem prejudicar a qualidade e a segurança do sistema elétrico do país.

Esta pesquisa de iniciação científica tem como objetivo principal buscar avaliar como a orientação de telhados em direções e inclinações variadas influencia no desempenho de sistemas de geração fotovoltaica.

Telhados reais dificilmente estão orientados ao Norte e na inclinação da latitude, sendo esta a geometria aproximada indicada para que o sistema atinja o valor máximo de geração de eletricidade ao longo do período de um ano. Muitos empreendedores demonstraram dúvidas quanto às perdas devido a decomposição do feixe de DNI ao longo da orientação real do telhado dos clientes. Este déficit de informação aumenta o risco dos investidores e a desinformação torna-se uma barreira para um crescimento maior da participação do recurso solar na geração distribuída. Softwares de projetos que fazem estes cálculos (Ex: PVSyst) estão aquém do alcance de pequenos geradores residenciais e comerciais.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Adjunto a realização deste trabalho elenco os seguintes objetivos específicos:

1. Dar suporte para desenvolvimento de projetos que alcancem o máximo desempenho possível na geração, diminuindo assim o custo final da energia fotovoltaica produzida e o tempo de retorno do investimento realizado;
2. Possibilitar a disseminação de informação ao público em geral e empreendedores do setor de energia solar com o intuito de aperfeiçoamento das instalações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede e aumento a eficiência de operação dos já instalados, quando as condições de infraestrutura forem adequadas para tal.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.1 ENERGIA VINDA DO SOL

O Sol é a principal fonte de energia para a Terra. Além de ser responsável pela manutenção da vida no Planeta, a radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de sua utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia, como por exemplo, a térmica e a elétrica. (CARVALHO, 2012)

A energia solar chega na superfície da Terra como ondas eletromagnéticas (fótons), seja de maneira direta ou difusa. No sol, é a fusão atômica a responsável pela liberação dessa energia — um processo termonuclear que converte cerca de 650 milhões de toneladas de hidrogênio em hélio a cada segundo. Na Terra, a energia solar é a origem do ciclo d'água, do

vento e da fotossíntese do reino vegetal, do qual depende o reino animal através das cadeias alimentares. (PINHO,2014)

No que tange a geração de energia elétrica, ao construirmos usinas hidroelétricas e eólicas, estamos utilizando o sol indiretamente como fonte renovável. Ao utilizarmos o petróleo e o carvão, estamos também utilizando o sol, mas de maneira não renovável — esses materiais são “fósseis” da vida vegetal e animal do passado. Ao utilizarmos a energia nuclear (não renovável), geotérmica ou de marés, estamos utilizando outras fontes de energia solar. (TIMILSINA, 2012)

O sol irradia constantemente, a intensidade dessa irradiação no nível da atmosfera é de cerca de 1.367 kW/m², valor também conhecido como constante solar. Uma parte dessa irradiação é refletida pela atmosfera; outra, absorvida por ela em forma de calor, e uma terceira parte atinge a superfície terrestre, sendo parcialmente absorvida e parcialmente refletida novamente para a atmosfera. A divisão entre reflexão, absorção e transmissão depende do estado da atmosfera, a distância que os raios solares a percorrem, umidade do ar e nebulosidade. A média mundial de energia irradiada, mesmo sobre as 24 horas do dia, é de cerca de 165 W/m², ou mais do que 5 mil vezes a necessidade energética da humanidade. (EPIA, 2010)

2.1.2 CONCEITOS BÁSICOS

A radiação solar é fonte de vida pois é através dela que crescem as plantas que fabricam oxigênio e nos dão alimento. Mas a radiação solar também pode ser aproveitada para produzir eletricidade e alimentar o mundo em que vivemos. Uma das formas de o fazer é através da conversão fotovoltaica em que um dispositivo, chamado célula solar, converte a energia solar em energia elétrica. Trata-se de um processo sustentável e inesgotável, com um recurso abundante e bem distribuído pelo planeta. (PEREIRA, 2017)

Para avaliarmos o potencial da energia solar fotovoltaica numa determinada região interessa caracterizar a radiação solar que chega a cada sítio e em cada instante. (PEREIRA, 2017)

O cálculo da irradiância horária num local de um planeta sem atmosfera seria um problema “bem comportado” dependendo só da latitude, do dia e da hora e de algum conhecimento de trigonometria esférica. Mas na Terra, temos atmosfera. Portanto é preciso levar em consideração os diferentes processos que aí ocorrem, em particular a dispersão e a absorção da luz nos gases e partículas atmosféricas, afetando de forma oposta os comprimentos de onda da radiação solar incidente. (PEREIRA, 2017)

Um dos principais efeitos da atmosfera, através do espalhamento, é alterar o ângulo de incidência de uma fração dos raios solares., De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017) a radiação é descrita em componentes, com características diferentes:

1. Irradiância extraterrestre (G_0): é a taxa de energia incidente por unidade de área em um plano horizontal imaginário situado no topo da atmosfera. É também conhecido como irradiância no topo da atmosfera ou GTOA .
2. Irradiância direta normal (G_n): também conhecida como DNI, é a taxa de energia por unidade de área proveniente diretamente do Sol que incide perpendicularmente à superfície.
3. Irradiância difusa horizontal (G_{dif}): é a taxa de energia incidente sobre uma superfície horizontal por unidade de área, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos (moléculas, material particulado, nuvens, etc.).
4. Irradiância direta horizontal (G_{dir}): é a taxa de energia por unidade de área do feixe solar direto numa superfície horizontal. Pode ser determinada como o produto entre a irradiância direta normal (DNI) e o cosseno do ângulo zenital solar.
5. Irradiância global horizontal (G): é a taxa de energia total por unidade de área incidente numa superfície horizontal.

6. A irradiância global é dada pela soma $G = G_{dif} + G_{dir}$ ou $G = G_{dif} + G_n \cdot \cos(\theta_z)$ onde θ_z é o ângulo zenital. Irradiância no plano inclinado (G_i): é a taxa de energia total por unidade de área incidente sobre um plano inclinado na latitude do local em relação à superfície da Terra.

2.1.3 MODELO DE CÉU CLARO

Céu claro é definido como a condição na qual é dada a inexistência de nuvens e baixa nebulosidade, as reduzidas dimensões das partículas de água fazem com que apenas os baixos comprimentos de onda, ou seja a porção azul do espectro siga em direção à superfície da terra, conferindo a cor azul, característica do céu. (KITTLER, 1981, BIRD & HULSTROM, 1981 a, b) Dentre os vários modelos paramétricos disponíveis na literatura, através de Iqbal (1983) é calculada a irradiância horizontal global sob céu sem nuvens como a soma de seus componentes diretos e difusos.

Nestas condições, o céu apresenta sua porção mais escura a 90 graus do sol e sua parte mais brilhante ao redor deste. O céu tende a ser mais brilhante nas regiões próximas à linha do horizonte. A luminância de qualquer ponto da abóbada celeste é correlacionada com a luminância do zênite, em função da posição do ponto considerado com relação ao zênite e ao sol. (KROCHMANN, 1974)

2.2 DADOS E METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho será produzir um gráfico da irradiação solar em função da inclinação e orientação da superfície de incidência similar ao apresentado na Figura 2 abaixo obtida por Cronemberger et al. (2012) para a cidade de Porto Alegre.

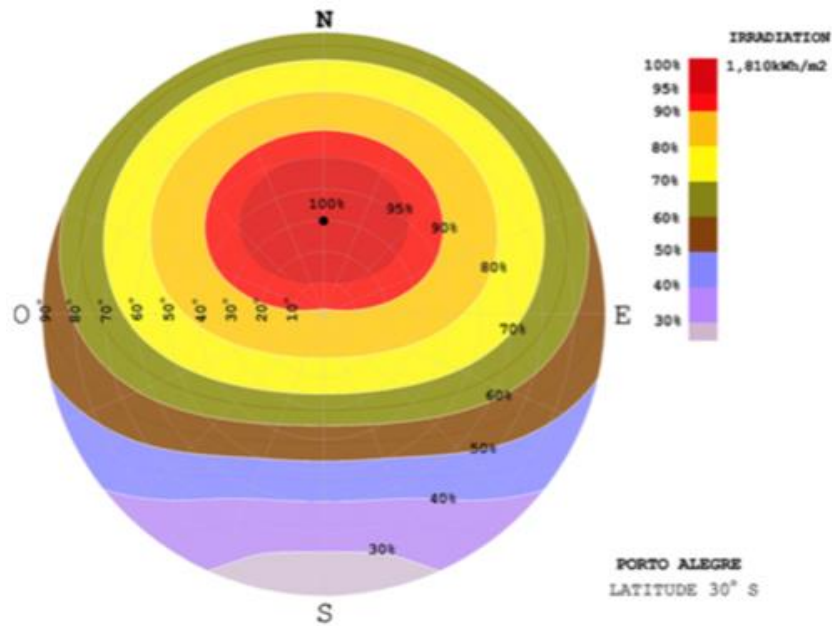


Figura 2. Porto Alegre: gráfico anual de irradiação global , em todas as inclinações e azimutes. (Fonte: Cronemberger,2012)

Em um primeiro momento, será necessário considerar um problema idealizado com premissa isotrópica da irradiação difusa incidente na superfície e partição direta/difusa constante. Um código numérico será necessário para estimar a irradiação solar em condição de céu sem nebulosidade (céu claro). A irradiância global de céu-claro num plano inclinado pode ser estimada utilizando o método de Perez et al. (2002).

Em um segundo momento, a análise estatística de nebulosidade horária será utilizada para considerar a anisotropia da radiação em função do ângulo zenital solar. Dados de estações meteorológicas e da rede SONDA coletados entre 2005 e 2020 serão utilizados nesta etapa. Dados de irradiação solar em diversas direções coletados na Universidade de Hannover também serão utilizados para validação da metodologia.

O plano de trabalho envolve as seguintes etapas:

1. Levantamento bibliográfico para identificar trabalhos similares desenvolvidos no Brasil e outras localidades do mundo;
2. Desenvolvimento de um código numérico para estimativa da irradiação global em plano inclinado;

3. Análise estatística de dados observados para avaliar anisotropia da incidência de radiação solar;
4. Estimativa da irradiação solar considerando a anisotropia;
5. Geração de gráficos em coordenadas polares para radiação incidente para diferentes orientações e inclinações da superfície inclinada.
6. Redação de relatórios e monografia de Trabalho de Conclusão de Curso.

2.3 RESULTADOS PARCIAIS

O estudo bibliográfico foi realizado através da leitura dos primeiros capítulos do livro “An Introduction to Solar Irradiation” de Muhammad Iqbal e da leitura da segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar, composto pelo esforço colaborativo do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Em resumo, a avaliação do potencial de recursos de energia solar numa região envolve basicamente três componentes: a distribuição espacial da irradiação solar, sua variabilidade temporal e as incertezas associadas às duas primeiras componentes. As três são essenciais para elaboração de cenários de aplicação e para estudos preliminares de viabilidade de aproveitamento do recurso solar.

A disponibilidade do recurso energético solar e sua variabilidade espacial e temporal estão intrinsecamente relacionadas a conceitos astronômicos. O primeiro dos fatores a serem considerados é a posição relativa entre o Sol e a Terra. A Terra orbita o Sol a uma distância média de cerca de 150 milhões de quilômetros, completando um ciclo a cada 365,25 dias solares. Ao longo desse período, a distância varia entre 1,47.108 km e 1,52.108 km e, como resultado, o fluxo de radiação solar (irradiância solar) oscila entre 1.325 W/m² e 1.412W/m².

O valor médio da irradiância solar igual a 1.366 W/ m^2 é definido como a constante solar (NREL, 2017).

Foi importante compreender conceitos definidos geometricamente pois os fatores astronômicos estabelecem a variabilidade da radiação solar incidente no topo da atmosfera:

1. A declinação solar (δ) é o ângulo formado pela inclinação do plano equatorial da Terra e a linha de direção Sol-Terra.
2. O ângulo horário solar (ω) corresponde ao deslocamento angular do movimento aparente do Sol devido à rotação da Terra e varia entre 180° e $+180^\circ$.
3. O ângulo zenital solar (θ_z) representa o ângulo formado entre a vertical no ponto de observação e a direção da linha que liga o mesmo ponto da superfície da Terra ao Sol.
4. O ângulo azimutal do Sol é o ângulo formado entre a linha de projeção da direção do Sol no plano horizontal com o meridiano do observador.

Junto a habilitação teórica, houve a prática com a principal ferramenta utilizada no projeto, programação em linguagem Python. Em um primeiro momento, foram aplicadas diretamente em Python, apenas com funções matemáticas, equações utilizadas no cálculo geométrico solar de variáveis solares. O resultado foi o código abaixo:

```

1  import math as m
2  import datetime as dt
3
4  # Input
5
6  input_data = input('Insira a data desejada (DD/MM): ')
7  input_hora = input('Insira a hora local (HH:MM): ')
8  lon_padrao = float(input('Insira a longitude padrao, em modulo: '))
9  orientacao_lon_padrao = int(input('Insira a orientacao da longitude padrao (E=1,
10 W=2 ou 0): '))
11 lon_local = float(input('Insira a longitude local, considerando Leste positivo: '))
12
13 # Transformacoes

```

```

14
15 t0 = dt.datetime.strptime("00:00:00", "%H:%M:%S")
16 data = dt.datetime.strptime(input_data, '%d/%m')
17 hora = dt.datetime.strptime(input_hora, "%H:%M")
18 horapadrao = hora - t0
19
20 # Calculos
21
22 dn = data.timetuple().tm_yday
23 gama = 2*m.pi*((dn-1)/365)
24 eq_tempo = ((0.000075 + 0.001868*m.cos(gama) - 0.032077*m.sin(gama) -
25 0.014615
26 *m.cos(2*gama)
27 - 0.04089*m.sin(2*gama))*13750.8)
28 eq_tempo_delta = dt.timedelta(seconds = eq_tempo)
29 correcao_longitudinal = abs(240*(lon_padrao - (abs(lon_local))))
30 correcao_longitudinal_delta = dt.timedelta(seconds = correcao_longitudinal)
31
32 # Analises
33
34 if orientacao_lon_padrao == 0 and lon_padrao < lon_local:
35     LAT = horapadrao + correcao_longitudinal_delta + eq_tempo_delta
36     LAT = LAT.total_seconds()
37     LAT = dt.timedelta(seconds = LAT)
38     print('LAT =', LAT)
39
40 elif orientacao_lon_padrao == 0 and lon_padrao > lon_local:
41     LAT = horapadrao - correcao_longitudinal_delta + eq_tempo_delta
42     LAT = LAT.total_seconds()
43     LAT = dt.timedelta(seconds = LAT)
44     print('LAT =', LAT)
45
46 elif orientacao_lon_padrao == 2 and lon_padrao > abs(lon_local):
47     LAT = horapadrao + correcao_longitudinal_delta + eq_tempo_delta
48     LAT = LAT.total_seconds()
49     LAT = dt.timedelta(seconds = LAT)
50     print('LAT =', LAT)
51
52 elif orientacao_lon_padrao == 2 and lon_padrao < abs(lon_local):
53     LAT = horapadrao - correcao_longitudinal_delta + eq_tempo_delta
54     LAT = LAT.total_seconds()
55     LAT = dt.timedelta(seconds = LAT)

```

```

56 print('LAT =', LAT)
57
58 elif orientacao_lon_padrao == 1 and lon_padrao < abs(lon_local):
59     LAT = horapadrao + correcao_longitudinal_delta + eq_tempo_delta
60     LAT = LAT.total_seconds()
61     LAT = dt.timedelta(seconds = LAT)
62     print('LAT =', LAT)
63
64 elif orientacao_lon_padrao == 1 and lon_padrao > abs(lon_local):
65     LAT = horapadrao - correcao_longitudinal_delta + eq_tempo_delta
66     LAT = LAT.total_seconds()
67     LAT = dt.timedelta(seconds = LAT)
68     print('LAT =', LAT)
69
70 print('Os valores utilizados para as analises, foram: ') ('dn =', dn, 'dias')
71 print('gama = ', gama, 'rad ou', m.degrees(gama), '°')
72 print('Equacao do Tempo =', eq_tempo_delta)
73 print('Correcao Longitudinal =', correcao_longitudinal_delta)

```

Com maior familiaridade com a ferramenta, foi possível utilizar as bibliotecas voltadas para cálculos solares, como a pvlib. O primeiro passo foi a geração de um diagrama solar (Figura 1). Para traçá-lo, o centro do gráfico se refere a uma coordenada fixa na Terra e as curvas mostram a posição aparente do Sol, variando de caminho em função da época do ano. Além da utilização da própria biblioteca para calcular algumas variáveis solares. O resultado foi o seguinte código:

```

1 import pandas as pd
2 import pvlib
3 import datetime as dt
4 import numpy as np
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 from pvlib import solarposition
7 from pvlib import location
8
9 #Variaveis
10
11 lat, lon = -23.55, -46.63
12 tz = 'America/Sao_Paulo'
13 data=dt.datetime.strptime('21/12','%d/%m')
14 dn=data.timetuple().tm_yday

```

```

15 time = pd.date_range('2019-01-01 00:00:00', '2020-01-00:00:00', closed='left',
16 freq='H', tz=tz)
    eq_time = pvlib.solarposition.equation_of_time_spencer71(dn)
18 hour_angle = pvlib.solarposition.hour_angle(time, lon, eq_time)
19 location = pvlib.location.Location(lat, lon, tz, altitude=0, name='Sao Paulo')
20
21 declination = pvlib.solarposition.declination_spencer71(dn)
22
23 print(location)
24 print("dn =", dn, "dias")
25 print("Equacao do Tempo = ", eq_time)
26 print("Angulo horario = ", hour_angle)
27 print("Declinacao = ", declination)
28
29 #Analises
30
31 solpos = solarposition.get_solarposition(time, lat, lon)
32 solpos = solpos.loc[solpos['apparent_elevation'] > 0, :]
33 ax = plt.subplot(1, 1, 1, projection='polar')
34 points = ax.scatter(np.radians(solpos.azimuth), solpos.apparent_zenith,
35 s=2, label=None, c=solpos.index.dayofyear)
36 ax.figure.colorbar(points)
37
38 for hour in np.unique(solpos.index.hour):
39     subset = solpos.loc[solpos.index.hour == hour, :]
40     r = subset.apparent_zenith
41     pos = solpos.loc[r.idxmin(), :]
42     ax.text(np.radians(pos['azimuth']), pos['apparent_zenith'], str(hour))
43     for date in pd.to_datetime(['2019-03-21', '2019-06-21', '2019-12-21']):
44         times = pd.date_range(date, date+pd.Timedelta('24h'), freq='5min', tz=tz)
45         solpos = solarposition.get_solarposition(times, lat, lon)
46         solpos = solpos.loc[solpos['apparent_elevation'] > 0, :]
47         label = date.strftime('%Y-%m-%d')
48         ax.plot(np.radians(solpos.azimuth), solpos.apparent_zenith, label=label)
49 ax.figure.legend(loc='upper left')
50 ax.set_theta_zero_location('N')
51 ax.set_theta_direction(-1)
52 ax.set_rmax(90)

```

Bem como o diagrama solar:

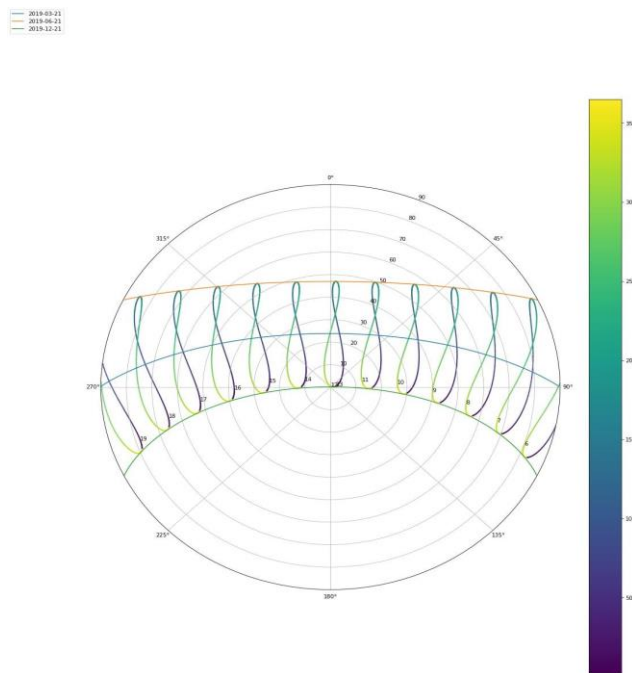


Figura 3. Diagrama solar gerado a partir da biblioteca pvlib. Fonte: autoral.

Desta maneira, com base nos procedimentos de Cronemberger et al., foi-se iniciando os cálculos referentes à criação do modelo de avaliação de perda. O código calcula também fatores como:

1. Massa de ar absoluta;
2. Altitude solar;
3. Ângulo de incidência;
4. Declinação solar;
5. Equação do Tempo;
6. Horas do nascer e por do Sol;
7. Ângulo horário;
8. Pressão da altitude;
9. Ângulos zenital e azimutal;
10. Dados de irradiância solar:
 - a. Irradiância Global;
 - b. Irradiância Difusa; e
 - c. Irradiância Direta.

Além dessas variáveis, o código gera o gráfico de modelo de dia de céu claro de Ineichen (Figura 4), de irradiância em comparação com a altitude solar (Figura 5), de comparação do modelo de céu claro de Ineichen com os dados de irradiância observados (Figura 6) e de determinação de dia de céu claro (Figura 7). Segue abaixo a íntegra do código, bem como os *plots* dos gráficos.

```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import pandas as pd
3 import pvlib
4 import datetime as dt
5 import math as m
6 import numpy as np
7 from pvlib import clearsky, atmosphere, solarposition
8 from pvlib.location import Location
9
10 #Solar position
11 lat, lon = -9.0689, -40.3197 #Petrolina
12 tz = 'America/Sao_Paulo'
13 data = dt.datetime.strptime('16/05/2012', '%d/%m/%Y')
14 dn = data.timetuple().tm_yday
15 time = pd.date_range('2012-05-16 00:00:01', '2012-05-17 00:00:01', closed='left',
16 freq='H', tz=tz)
17 eq_time = pvlib.solarposition.equation_of_time_spencer71(dn)
18 hour_angle = pvlib.solarposition.hourangle(time, lon, eq_time
19 loc = pvlib.location.Location(lat, lon, tz, altitude=387, name='Petrolina')
20 declination = pvlib.solarposition.declination_spencer71(dn)
21 solpos = solarposition.get_solarposition(time, lat, lon)
22 horasssr = pvlib.solarposition.sun_rise_set_transit_ephem(time, lat, lon)
23 print(loc)
24
25 #Céu Limpo (get_clearsky)
26
27 petrolina = Location(lat, lon, tz, 387, 'Petrolina')
28
29 #Céu Limpo (Ineichen)
30
31 zenith = solpos['apparent_zenith']
32 airmass = pvlib.atmosphere.get_relative_airmass(zenith)
33 pressao = pvlib.atmosphere.alt2pres(387)
34 airmass = pvlib.atmosphere.get_absolute_airmass(airmass, pressao)
35 linke = pvlib.clearsky.lookup_linke_turbidity(time, lat, lon)
36 dni_extra = pvlib.irradiance.get_extra_radiation(time)
37 ineichen = clearsky.ineichen(zenith, airmass, linke, 387, dni_extra)

```



```

38 plt.figure()
39 ax = ineichen.plot()
40 ax.set_ylabel('Irradiance $W/m^2$')
41 ax.set_title('Ineichen Clear Sky Model')
42 ax.legend(loc=2)
43
44 #Irradiância x Altitude solar
45
46 altitude = pd.Series(np.linspace(-10, 90, 101))
47 aod700 = 0.1
48 precipitable_water = 1
49 solis = clearsky.simplified_solis(altitude, aod700, precipitable_water, 101325, 1364)
50 ax = solis.plot()
51 ax.set_xlabel('Altitude (deg)')
52 ax.set_ylabel('Irradiância $W/m^2$')
53 ax.set_title('Irradiância x Altitude solar')
54 ax.set_title('Irradiância x Altitude solar')
55 ax.legend(loc=2)
56 ax.legend(loc=2)
57
58 #Detect clear sky
59
60 detect_petrolina = Location(-9.0689, -40.3197, altitude=387)
61 detect_time = pd.date_range(start='2012-05-16 00:01:00', tz='Etc/GMT+3',
62 periods=1440, freq='1 min')
63 detect = detect_petrolina.get_clearsky(detect_time)
64 detect_alt = detect.resample('60T', closed='right').mean()
65 beam = detect_alt['ghi'] - detect_alt['dhi']
66 detect_alt['beam'] = beam
67 ghi = detect['ghi']*.97
68
69 #Plot irradiance
70
71 fig, ax = plt.subplots()
72 ghi.plot(label='input')
73 detect['ghi'].plot(label='ineichen clear')
74 ax.set_ylabel('Irradiance $W/m^2$')
75 plt.legend(loc=4)
76
77 #Plot Clearky
78
79 clear_samples = clearsky.detect_clearsky(ghi, detect['ghi']), detect.index, 60)
80 fig, ax = plt.subplots()
81 clear_samples.astype(float).plot()
82 ax.set_ylabel('Clear (1) or Cloudy (0)')

```

83 `aoi = pvlib.irradiance.aoi(30, 150, solpos['zenith'], solpos['azimuth'])`

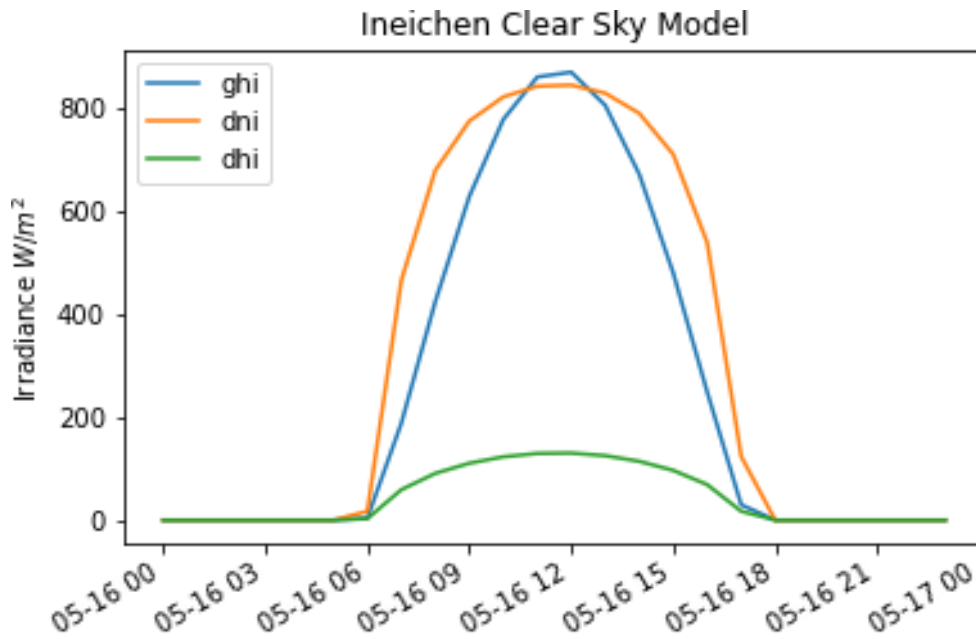


Figura 4. Gráfico do modelo de dia de céu claro de Ineichen demonstrando a variação das componentes solares (irradiância global, direta e difusa) durante o dia. Fonte: autoral.

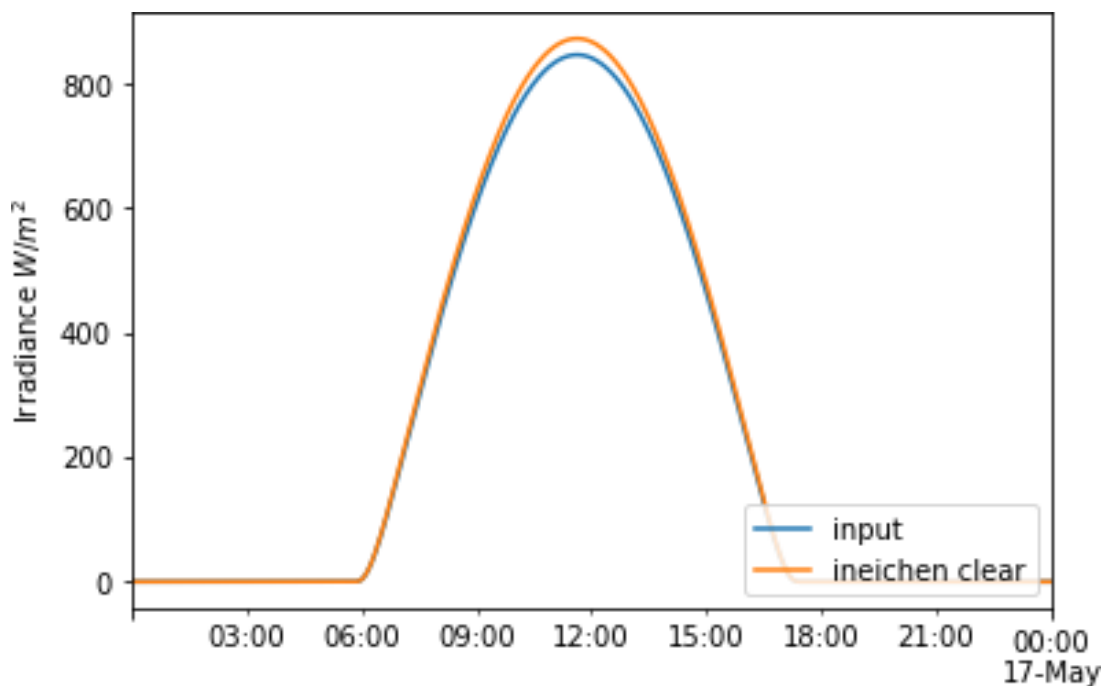


Figura 5. Gráfico comparativo de cada componente solar (irradiância global, direta e difusa) em relação à altitude solar. Fonte: autoral

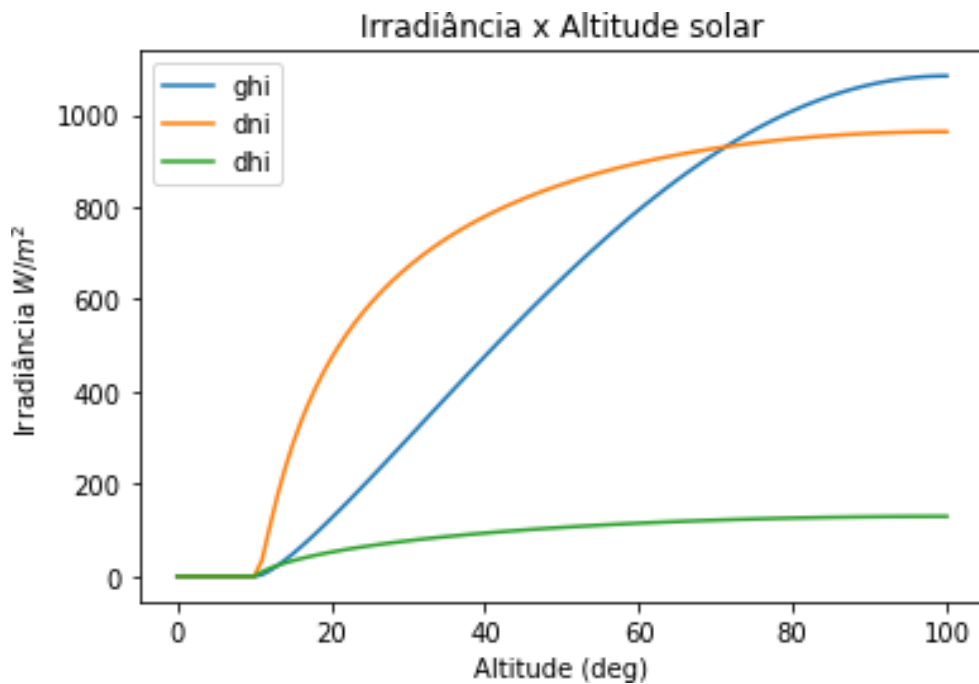


Figura 6. Gráfico comparando os dados de irradiância observados com aqueles esperados pelo modelo de dia decéu claro de Ineichen. Fonte: autoral.

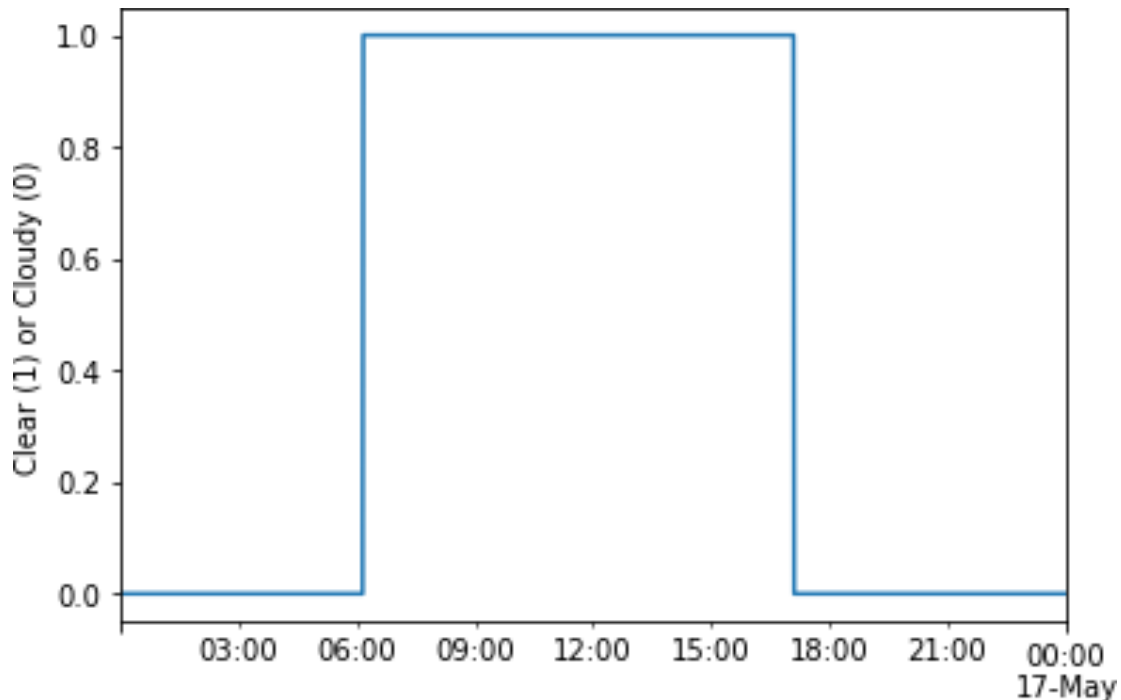


Figura 7. Gráfico do modelo de dia de céu claro. Avalia se está o céu está claro (1) ou encoberto (0) durante as horas do dia. Fonte: autoral

As diferenças entre o céu-claro do Ineichen e as medidas do dia 16/06 (Figura 8) são esperadas pois o modelo de Ineichen é uma aproximação para o comportamento médio da atmosfera. Este modelo deverá analisar todos os dias do ano, mas por enquanto avalia apenas um (16/05).

3. CONCLUSÃO

Apesar de a geração fotovoltaica não possuir participação expressiva na matriz elétrica nacional, esta fonte vem crescendo de forma acentuada nos últimos anos, impulsionada por algumas regulações específicas e incentivos. Desse modo, a inserção dessa tecnologia depende da sua capacidade própria de se viabilizar economicamente, acarretando um prazo maior para a popularização da fonte.

A partir da revisão apresentada nota-se o importante papel que a energia solar pode desempenhar na expansão da matriz elétrica brasileira, aumentando sua resiliência com a diversificação das fontes e exploração de possíveis complementaridades. O aproveitamento do recurso energético solar consiste na conversão da energia emitida pelo Sol em energia térmica ou diretamente em energia elétrica (processo fotovoltaico). O uso de tecnologias de conversão de energia solar vem crescendo mundialmente a taxas elevadas, tanto para aplicações térmicas, quanto fotovoltaicas. Entre 2010 e 2016, a capacidade instalada global por sistemas fotovoltaicos cresceu em média 40% contra 16% da eólica e aproximadamente 3% da hídrica (REN21, 2017). O uso de sistemas fotovoltaicos possibilita a geração distribuída de eletricidade com plantas de pequena e média escala instaladas em edifícios residenciais e comerciais produzindo energia para consumo próprio. A geração distribuída pode contribuir para a redução de perdas no Sistema Interligado Nacional (SIN) em razão da distância entre as plantas de geração e os centros consumidores.

O presente estudo visa no próximo ano o aprimoramento do código numérico que estima a irradiação global em plano inclinado, a análise estatística de dados observados avaliando a anisotropia da incidência de radiação solar. Um estudo mais aprofundado das variáveis para estimativa da irradiação solar considerando a anisotropia e por fim, a geração de gráficos em coordenadas polares para a irradiação em diferentes orientações e inclinações da superfície inclinada.

Dessa forma, o presente trabalho intenciona obter espaço para o desenvolvimento de políticas públicas baseadas na utilização de sistemas fotovoltaicos, visando ao desenvolvimento econômico e social o uso da incidência solar abundante no território nacional. Ao mesmo tempo, essas políticas poderão colaborar para a mitigação das emissões de gases do efeito estufa (GEE) e de adaptação aos efeitos adversos da mudança do clima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira.** [S.l.], p. 1-176, 2012.
- AZEREDO, H. A. de. **O edifício até a sua cobertura.** 2. ed. revista. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.
- BANOS, R.; Manzano-Agugliaro, F.; Montoya, F. G.; Gil C.; Alcayde, A.; Gómez, J.: **Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 1753-1766, 2011.
- BENEDITO, R. S.; Zilles, R.: **Caracterização da produção de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados a rede no Brasil.** Avances en Energiaas Renovables y Medio Ambiente 13, 2009.
- BERINGER, S.; Schilke, H.; Lohse. I.; Seckmeyer, G.: **Case study showing that the tilt angle of photovoltaic plants is nearly irrelevant.** Solar Energy, v 85, p. 470-476, 2011.
- BIRD R. AND HULSTROM R. L, **Direct insolation models, Transactions of the ASME Journal Solar Energy Engineering**, 103, 182-192, (1981 a),
- BIRD R. AND HULSTROM R. L. **A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces.** Report SERI/TR-642-761, Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado, U.S.A, (1981 b),
- CARVALHO, M. G. **EU energy and climate change strategy.** Energy. [S.l.],v.40, p. 19-22, 2012.
- CHENG, C. L.; Jimenes, C. S. S.; Lee, M. C.: **Research of BIPV optimal tilted angle, use of latitude concept for south oriented plans.** Renewable Energy, v 34, p. 1644-1650, 2009.

- CRONEMBERGER, Joara; CAAMAÑO-MARTÍN, Estefanía; SÁNCHEZ, Sergio Vega. **Assessing the solar irradiation potential for solar photovoltaic applications in buildings at low latitudes – Making the case for Brazil**. Madrid, 2012.
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA E ENERGÉTICA. Nota Técnica EPE: **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Rio de Janeiro: MME – Ministério de Minas e Energia, 2012.
- EPIA, European Photovoltaic Industry Association, **Unlocking the Sunbelt Potential of Photovoltaics**. Bruxelas, 2010.
- FERREIRA, M. J. G. **Inserção da energia solar fotovoltaica no Brasil. São Paulo, Brasil: Dissertação de Mestrado**, Programa de Pós-Graduação em Energia, USP, 1993.
- GALDINO, M. A.; LIMA, J. H. **PRODEEM - O Programa Nacional de Eletrificação Rural baseado em energia solar fotovoltaica**. Rio de Janeiro, Brasil: Anais do IX CBE - Congresso Brasileiro de Energia. COPPE/UFRJ - PPE, v. IV, 2002. p. 1806-1814.
- GUNERHAN, A.; Hepbasli, A.: **Determination of the optimal tilt angle of solar collectors for building applications**. Building and Environment, v 42, p. 779-783, 2007.
- HUSSEIN, H. M. S.; Ahmed, G. E.; El-Ghetany, H. H.: **Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations**. Energy Conversion and Management, v 45, p. 2441-2452, 2004.
- IQBAL, Muhammad. **An Introduction to Solar Radiation**. Vancouver, 1983.
- IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable Energy and Jobs**, Annual Review 2015. [S.l.], 2015.
- KITTLER, R. **A Universal Calculation Method for Simple Predetermination of Natural Radiation on Building Surfaces and Solar Collectors – Building & Environment**, Vol. 16, No 3, pp. 177-182, UK, 1981

- KROCHMANN, J. **Quantitative data on daylight for illuminating engineering – CIBSE Lighting, Research & Technology**, Vol. 6, No 3, pp. 165-171, 1974
- MARION, Bill. **Influence of Atmospheric Variations on Photovoltaic Performance and Modeling: Their Effects for Days with Clear Skies**. Proceedings of 2012 IEEE Photovoltaic Specialists Conference Austin, Texas, USA, 2012.
- MARTINS, F. R.; Pereira, E. B.; Silva, S. A. B.; Abreu, S. L.; Colle, S.: **Solar energy scenarios in Brazil**. Part 1: Resource assessment. Energy Policy 36, 2843–2854, 2008a.
- MARTINS, F. R.; Rütger, R.; Pereira, E. B.; Abreu, S. L.: **Solar energy scenarios in Brazil. Part 2: Photovoltaics applications**. Energy Policy 36, 2865–2877, 2008b.
- MEHLER, E. D.; Zervas, P. L.; Sarimveis, J. A.; Markatos, N. C.: **Determination of optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays**. Renewable Energy, v 35, p. 2468-2475, 2010.
- MITIDIERI FILHO, C. V.; HACHICH, V. F. **Telhados: como construir. Técnica: a revista do engenheiro civil**, São Paulo, ano 2, n. 9, p. 49-53, mar./abr. 1994.
- MUNTASSER, M. A., et al. **Photovoltaic marketing in developing countries**. Applied Energy. [S.l.],v. 65, p. 67–72, 2000.
- NASA - **National Aeronautics and Space Administration**. Cosmicopia. Disponível em: . Acesso em: mai. 2021
- PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; GONÇALVES, André Rodrigues; COSTA, Rodrigo Santos; LIMA, Francisco J. Lopes de; RUTHER, Ricardo; ABREU, Samuel Luna de; TIEPOLO, Gerson Máximo; PEREIRA, Silvia Vitorino; SOUZA, Jefferson Gonçalves. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos, 2017.

- PEREZ, R, et al. **A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation.** Solar Energy, vol. 73, no. 5, p. 307-317, 2002
- PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual De Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** CEPEL – CRESESB, Rio de Janeiro, 2014.
- REN21: RENEABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. **Renewables 2012:** global status report. Paris, 2012.
- _____. RENEABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. **Renewables 2015:** global status report. Paris, 2015.
- RUTHER, R.; ZILLES, R.: **Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil.** Energy Policy, v 39, p. 1027-1030, 2011.
- SPERTINO, F.; DI LEO, P; COCINA, V, **Economic analysis of investment in the rooftop photovoltaic systems: A long-term research in the two main markets,** Renewable and Sustainable Energy Reviews. [S.l.],v. 28, p. 531-540,set.2013.
- TIMILSINA, G. R.; KURDGELASHVILI, L.; NARBEL, P. A. **Solar energy: Markets, economics and policies.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. [S.l.], v. 16, p. 449–465, 2012.
- VALKILA, N.; SAARI, A. **Urgent need for new approach to energy policy: The case of Finland.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. [S.l.], v. 14, p. 2068–2076, 2010.
- VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração.** 3. ed. São Paulo: Atlas, 2000.
- WWF – BRASIL. **Desafios e Oportunidades para a energia solar fotovoltaica no Brasil: recomendações para políticas públicas.** Brasília, 2015.

YUAN, J.; HOU, Y.; XU, M., **China's 2020 carbon intensity target: Consistency, implementations, and policy implications**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [S.l.],v. 16, p. 4970–4981, 2012.