



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DAS ÁGUAS
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DAS
ÁGUAS**

ANNA RAISA DA COSTA ALVES

**SAZONALIDADE DA RADIAÇÃO SOLAR E A RELAÇÃO COM A GERAÇÃO DE
ENERGIA FOTOVOLTAICA EM SANTARÉM- PARÁ, AMAZÔNIA, BRASIL**

SANTARÉM-PA

2021

ANNA RAISA DA COSTA ALVES

**SAZONALIDADE DA RADIAÇÃO SOLAR E A RELAÇÃO COM A GERAÇÃO DE
ENERGIA FOTOVOLTAICA NA CIDADE DE SANTARÉM-PARÁ, AMAZÔNIA,
BRASIL**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia das Águas da Universidade Federal do Oeste do Pará para obtenção do título de Bacharela Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia das Águas.

Área de Concentração: Climatologia

Orientador:

Prof^ª. Dra. Leidiane Leão de Oliveira

SANTARÉM-PA

2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA

- A474s Alves, Anna Raisa da Costa
Sazonalidade da radiação solar e a relação com a geração de energia fotovoltaica na cidade de Santarém – Pará, Amazônia, Brasil. / Anna Raisa da Costa Alves. – Santarém, 2021.
28 p.: il.
Inclui bibliografias.
- Orientadora: Leidiane Leão de Oliveira
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Ciências e Tecnologia das Águas, Curso Bacharelado Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia das Águas.
1. Energia solar. 2. Energia renovável. 3. Produção de energia solar. I. Oliveira, Leidiane Leão de, *orient.* II. Título.

CDD: 23 ed. 621.47098115

ANNA RAISA DA COSTA ALVES

**SAZONALIDADE DA RADIAÇÃO SOLAR E A RELAÇÃO COM A GERAÇÃO
DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NA CIDADE DE SANTARÉM-PARÁ,
AMAZÔNIA, BRASIL**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia das Águas da Universidade Federal do Oeste do Pará para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia das Águas.

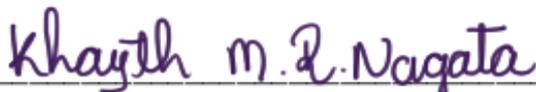
Orientadora: Dra. Leidiane Leão de Oliveira

Conceito: 9,6

Data da aprovação: 27/8/2021



Profa. Dra. Leidiane Leão de Oliveira – Orientador(a)
Universidade Federal do Oeste de Pará (UFOPA)



Profa. Ma. Khayth Marrony Rabelo Nagata
Universidade Federal do Oeste de Pará (UFOPA)



Prof. Me. Elton Raniere Moura
Universidade Federal do Oeste de Pará (UFOPA)

AGRADECIMENTO

Nada é possível em nossas vidas, se não colocarmos Deus em primeiro lugar. Muito Obrigada SENHOR, porque até aqui tua mão me sustentou.

A você minha amada e preciosa mãe, Raimunda da C. Costa Alves e a você meu amado e precioso pai, Jorlando da Conceição Alves que me amam incondicionalmente e sempre me incentivam a buscar o melhor de mim. Quero lhes dizer que essa é só uma etapa da minha vida que está se cumprindo e que ainda vou conquistar o mundo através do conhecimento.

A minha inestimável família que sempre olharam, zelaram e oraram por mim. Palavra nenhuma irá expressar o tamanho da minha Gratidão.

Ao meu marido que por ora precisou abrir mão do seu lugar na universidade, para que eu pudesse prosseguir. Saiba que assim como você foi por mim, eu serei por você. O propósito do nosso Deus, vai se cumprir na sua vida. Tenha fé.

A minha querida orientadora Prof^a Dr^a Leidiane Leão de Oliveira, muito obrigada pela paciência, orientação e principalmente por acreditar em mim, quando eu mesma já não tinha mais fé. Imensamente Grata.

Aos srs. Joel Prata Barbosa, Euler Sarmiento e Luciano por me receberem de portas abertas, pelo feedback de informações e apoio a pesquisa. Ao sr. José Palheta pela colaboração inestimável.

Minha amada filha Anna Flor, agora consigo compreender que você veio para me fortalecer. Mostrar-me que até nos momentos que eu achei impossível continuar, sua presença me tornava mais forte. É por você e sempre será.

A minha colega Josiane Ribeiro, que me auxiliou na pesquisa, sempre lembrarei com muito carinho de você. E sim, Deus permite a nossa evolução sempre. Namastê.

A minha colega Ana Paula que me ajudou e confiou em mim. Desejo que neste momento sua pequena joia sinta todo amor da maternidade e que sua família seja muito abençoada.

RESUMO

No atual contexto de desenvolvimento sustentável, a humanidade busca fontes alternativas de energia, sendo a energia solar uma destas fontes, sendo que a disponibilidade de energia solar na superfície terrestre é muito superior à demanda global de energia elétrica. É importante o levantamento de dados confiáveis de radiação solar, bem como estabelecer uma correlação que permita caracterizar o potencial sazonal da radiação e correlacionar com a efetividade da geração de energia fotovoltaica distribuída ao longo do ano. A pesquisa teve o objetivo de caracterizar a radiação solar global, bem como a sua distribuição sazonal, utilizando os dados horários (6 a 18 h) e mensais, compreendidos entre setembro de 2015 a dezembro de 2018, aplicando cálculo de média aritmética. E relacionar com a geração de energia fotovoltaica média mensal para o período de maio de 2018 a julho 2021. As análises dos dados, tabelas e gráficos foram gerados utilizando o software Microsoft Excel. Observa-se que os horários de maior pico de incidência de radiação solar, são as 13 e 14 h, tendo um quantitativo de 5.633 KJ/m². Para o período seco, a radiação solar global totaliza 53% e 47% no período chuvoso. Os meses de setembro e outubro, concentram os maiores valores de radiação solar com 21.796 e 21.556 KJ/m² e a geração de energia fotovoltaica é de 1.200 kW/h. Houve uma correlação estatisticamente significativa entre a radiação solar e a geração de energia fotovoltaica ($R=0,70$; $p<0,05$) mostrando que a potência gerada por um sistema fotovoltaico está diretamente ligada a intensidade de radiação. Os dados obtidos, por ora foram suficientes para responder as questões levantadas. A cidade de Santarém-PA tem potencial de radiação solar global capaz de satisfazer a geração de energia solar fotovoltaica, mesmo no período de inverno amazônico onde se tem uma perda de 22% radiação solar.

Palavras-chave: Energia solar. Energia renovável. Produção de energia solar.

ABSTRACT

In the current context of sustainable development, humanity is looking for alternative energy sources, with solar energy being one of these sources, and the availability of solar energy on the earth's surface is much higher than the global demand for electricity. It is important to collect reliable solar radiation data, as well as to establish a correlation that allows characterizing the seasonal radiation potential and correlating it with the effectiveness of the generation of photovoltaic energy distributed throughout the year. The research aimed to characterize the global solar radiation, as well as its seasonal distribution, using hourly (6 to 6 pm) and monthly data, from September 2015 to December 2018, applying arithmetic mean calculation. And relate it to the generation of photovoltaic energy for the period from May 2018 to July 2021. Using the computer program Microsoft Excel, tables and graphs were generated that helped to better understand the research and explain the results. It is observed that the times with the highest peak incidence of solar radiation are 1pm and 2pm, with a quantity of 5,633 KJ/m². For the dry season, global solar radiation totals 53%, and 47% in the rainy season. The months of September and October concentrate the highest levels of solar radiation with 21,796 and 21,556 KJ/m² and photovoltaic energy generation is 1,200 kW/h. There was a statistically significant correlation between solar radiation and photovoltaic energy generation ($R=0.70$; $p<0.05$) showing that the power generated by a photovoltaic system is directly linked to the radiation intensity. The data obtained, for now, were sufficient to answer the questions raised. The city of Santarém-PA has global solar radiation potential capable of satisfying the generation of photovoltaic solar energy, even in the winter period where there is a 22% loss of solar radiation.

Keywords: Solar energy. Renewable energy. Solar energy production.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Matriz Energética Brasileira.

Figura 2: Mapa de localização da Estação Meteorológica de Santarém-PA.

Figura 3: Radiação Solar Global horária para Santarém-PA para o período de 2015 a 2018.

Figura 4: Radiação Solar Global mensal em Santarém-PA para o período de 2015 a 2018.

Figura 5: Porcentagem de distribuição da radiação solar global anual em Santarém-PA para o período de 2015 a 2018.

Figura 6: Distribuição da radiação solar global mensal para os períodos seco (junho a novembro) e chuvoso (dezembro a maio), para o período de 2015 a 2018.

Figura 7: Geração de Energia Solar Fotovoltaica, para os períodos de maio 2018 a julho de 2021.

Figura 8: Correlação da radiação solar global, com a geração de energia solar fotovoltaica, para os períodos de abril 2018 a julho de 2021.

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
CO₂	Dióxido de Carbono
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GW	Gigawatt
IEA	Instituto de Economia Agrícola
MW	Mega Watts
Off-Grid	Na rede (tradução livre) de distribução de energia
On-Grid	Fora da rede (tradução livre) de distribução de energia
PROGD	Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica
TW/h	Terawatt-hora (equivale a 10^{12} Wh ou $3,6 \times 10^{15}$ joules)
Ton	Tonelada (as)
kW/h	Quilo watts / hora
Kj/m²	Quilo Joules / metro quadrado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS.....	12
2.1 Geral	12
2.2 Específicos	12
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
3.1 Radiação solar.....	12
3.2 Energia solar fotovoltaica.....	13
3.3 Matriz energética brasileira	14
4 MATERIAL E MÉTODOS	16
4.1 Área de estudo	16
4.2 Análise de dados.....	17
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
6. CONCLUSÃO	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26

1 INTRODUÇÃO

A radiação solar é a força motriz para muitos processos físico-químicos e biológicos que ocorrem no sistema superfície-atmosfera, e constitui-se em uma importante variável meteorológica em estudos de necessidade hídrica de culturas, modelagem do crescimento e produção vegetal, mudanças climáticas, entre outros (BORGES et al., 2010). A quantidade de radiação solar que chega à superfície terrestre não é uniforme no globo. Ela é influenciada por 3 fatores: o período do ano e do dia, determinados pela distância média planeta-sol, excentricidade e latitude terrestre, respectivamente, que controlam a quantidade da densidade do fluxo de energia solar que chega na superfície (HARTMANN, 1994; AYOADE, 1983).

No atual contexto de desenvolvimento sustentável, a humanidade busca fontes alternativas de energia, sendo a energia solar uma destas fontes. Portanto, estudos que relacionados a esta variável são importantes para a avaliação de possíveis regiões com potencial para usar este tipo de energia, assim como, se avaliar como a radiação solar influencia os fluxos de energia em superfície (BELÚCIO et al., 2014).

A disponibilidade de energia solar na superfície terrestre é muito superior à demanda global de energia elétrica. À medida que as tecnologias que fazem uso da energia solar se tornam mais competitivas ante outras opções, a participação dessa fonte na matriz elétrica tende a crescer. Isto já se verifica em diversos países, inclusive no Brasil. Para o futuro, as projeções indicam aumento expressivo da participação da fonte solar na matriz de geração de energia elétrica mundial, tendendo a se manter nos próximos anos, face ao apelo para a produção de energia a partir de fontes renováveis, às perspectivas de redução do custo de geração e ao aumento da eficiência da tecnologia fotovoltaica (BEZERRA, 2021).

É consenso que, o desenvolvimento energético trouxe “a reboque” um custo ambiental que de pequeno não tem nada. Após, séculos e mais séculos de emissão de gases tóxicos à atmosfera (causadores do efeito estufa, principalmente), degradação de grandes extensões de terras e poluição de importantes mananciais de água; vê-se atualmente, um ainda tímido movimento de grupos de indivíduos preocupados com a questão ambiental. Na realidade, isto tem relação com a própria sobrevivência do gênero humano, tendo em vista a ameaça de esgotamento de recursos naturais importantes que podem colocar a vida humana em questão (LAVEZZO, 2016).

Atualmente, mais de 80% da necessidade global de energia primária é suprida pela queima de combustíveis fósseis (IEA, 2017). No entanto, a poluição causada pelo uso desses combustíveis, que está diretamente relacionada ao desequilíbrio climático da Terra, aliada ao esgotamento de recursos naturais, são desafios inevitáveis que demandam o desenvolvimento de alternativas para o fornecimento de energia elétrica. Nesse contexto, fica evidente a necessidade do maior uso de fontes energéticas limpas e sustentáveis. Portanto, é natural que haja uma busca cada vez maior pela utilização da energia proveniente do sol, que se trata da fonte energética mais abundante e acessível do planeta (NASCIMENTO, 2018).

Essas fontes de energia alternativa devem ser vistas como uma oportunidade para depender menos do combustível fóssil e das grandes usinas hidrelétricas. O país possui um enorme potencial de energia solar, eólica e da biomassa (MELO et al., 2018).

A geração de energia com base em fontes renováveis pelos próprios consumidores tem sido aos poucos estimulada pelo governo brasileiro. Em 2015, o governo federal lançou o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (PROGD), para ampliar e aprofundar as ações de estímulo à geração de energia pelos próprios consumidores, com base nas fontes renováveis de energia (em especial a solar fotovoltaica). O PROGD pode movimentar pouco mais de R\$ 100 bilhões em investimentos até 2030. Com ele, espera-se que até esse ano, 2,7 milhões de unidades consumidoras poderão ter energia gerada por elas mesmas, entre residências, comércios, indústrias e no setor agrícola, o que pode resultar em 23.500MW (48TW/h produzidos) de energia limpa e renovável, o equivalente à metade da geração da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Com isso, o Brasil pode evitar que sejam emitidos 29×10³ ton de CO₂ na atmosfera (BONDARIK, 2018).

Como citado, é de extrema urgência que todos possam ter conhecimento dos problemas ambientais devido a utilização de fontes de energia não renováveis, sendo possível uma conciliação com o meio ambiente, usufruindo sem destruí-lo ou extingui-lo. A cidade de Santarém Pará, já se mostrou com um grande potencial para aproveitamento energético fotovoltaico, uma vez que é notório o forte crescimento de empresas que facilitam ao consumidor a inserção desse sistema em sua residência, não esquecendo da enorme contribuição ambiental, já que durante a produção dessa energia não há emissão de gases efeito estufa como CO₂ e metano.

Santarém, possui grande potencial de utilização de sistemas fotovoltaicos para suprir demandas de residências, indústrias e residências rurais isoladas. É importante

o levantamento de dados confiáveis de radiação solar em plano horizontal, obtidos por piranômetro na estação meteorológica de superfície de Santarém bem como estabelecer uma correlação que permita caracterizar o potencial sazonal da radiação solar e correlacionar com a efetividade da geração da energia fotovoltaica distribuída ao longo do ano.

O presente trabalho buscou caracterizar a radiação solar e sua distribuição sazonal bem como correlacionar seu aproveitamento na geração de energia fotovoltaica em Santarém-PA. A fim de responder os seguintes questionamentos, será que a radiação solar é efetiva o ano inteiro para geração de energia fotovoltaica, mesmo no período chuvoso? Como funciona o acúmulo de energia fotovoltaica neste período?

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Caracterizar a radiação solar e sua distribuição sazonal bem como correlacionar seu aproveitamento na geração de energia fotovoltaica em Santarém-PA.

2.2 Específicos

- Avaliar a radiação solar global horária, mensal e anual, no período de setembro 2015 a dezembro 2018 na cidade de Santarém-PA;
- Relacionar a sazonalidade da radiação solar global com a produtividade na geração de energia fotovoltaica na cidade de Santarém-PA no período de abril de 2018 a julho de 2021.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Radiação Solar

A quantidade de radiação solar que chega à superfície terrestre não é uniforme no globo. Ela é influenciada por 3 fatores: o período do ano e do dia, determinados pela distância média planeta-sol, excentricidade e latitude terrestre, respectivamente, que controlam a quantidade da densidade do fluxo de energia solar que chega na superfície (HARTMANN, 1994; AYOADE, 1983). A zona Equatorial recebe o máximo de insolação nos equinócios e o mínimo nos solstícios, enquanto as regiões polares recebem o máximo de insolação durante os solstícios de verão, quando os dias passam a ter duração de 24 horas (AYOADE, 1983; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

A radiação solar é um elemento meteorológico que influencia processos desde a escala micro meteorológica, quando se tratamos fluxos turbulentos, até a grande escala, ao promover aquecimento diferencial no planeta e gerando a circulação geral da atmosfera. No atual contexto de desenvolvimento sustentável, a humanidade busca fontes alternativas de energia, sendo a energia solar uma destas fontes. Portanto, estudos que relacionados a esta variável são importantes para a avaliação de possíveis regiões com potencial para usar este tipo de energia, assim como, se avaliar como a radiação solar influencia os fluxos de energia em superfície (BELÚCIO et al., 2014).

Conforme o Atlas Brasileiro de Energia solar 2ª ed. (2017) e baseado na nomenclatura de Duffie e Beckman (2013), às componentes da radiação solar podem ser descritas como:

- Irradiância extraterrestre: taxa de energia incidente por unidade de área em um plano horizontal imaginário situado no topo da atmosfera.
- Irradiância global horizontal: taxa de energia total por unidade de área incidente numa superfície horizontal. A irradiância global é dada pela soma das irradiâncias direta e difusa.
- Irradiância direta normal: também conhecida como DNI, é a taxa de energia por unidade de área proveniente diretamente do Sol que incide perpendicularmente à superfície.
- Irradiância direta: é a taxa de energia por unidade de área do feixe solar direto numa superfície horizontal.
- Irradiância difusa: 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.).
- Irradiação refletida (albedo): irradiação refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, terrenos rochosos, etc.).

3.2 Energia Solar Fotovoltaica

Hémery et al. (1993) estimam que os primeiros relatos referentes ao aproveitamento da energia solar para fins de iluminação, deu-se no período Paleolítico. Por possuir hábitos diurnos por natureza, desde os primórdios, houve uma preocupação com a obtenção de uma forma de luz artificial, sendo

que foi no domínio da produção do fogo nesse período, com o uso de um ramo de vegetal resinoso, que o homem deu seu primeiro passo para alcançar esse objetivo (FARIAS & SELITTO, 2011).

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Edmund Becquerel, onde notou-se o aparecimento de uma tensão entre os eletrodos de solução condutora, quando esta era iluminada pela luz solar (GACIA, 1995).

Atualmente, o maior produtor desta energia é a China, na qual, o crescimento se deve pelo apoio de seu governo. Em meados dos anos 50, teve início o incentivo para pesquisas e o desenvolvimento de painéis solares fotovoltaicos, esta tecnologia teve grande importância para o país que é o maior emissor global de poluentes (LAGRIMANTE, 2018).

Embora existam outras formas de gerar energia elétrica a partir da fonte solar, tem-se sobressaído a utilização da tecnologia fotovoltaica, particularmente por sua praticidade. Por meio de células fotovoltaicas, onde a luz solar é convertida diretamente em eletricidade. Essas células fotovoltaicas são reunidas em módulos de diversas capacidades, consistindo estes nos produtos disponibilizados comercialmente no mercado. Os módulos podem ser utilizados individualmente ou associados para formar empreendimentos de geração de qualquer porte, tanto em sistemas autônomos (off grid) como em sistemas ligados à rede elétrica (on grid) (BEZERRA, 2021).

3.3 Matriz Energética Brasileira

O aumento da participação de fontes de energia renovável na matriz energética brasileira e mundial mostra-se imprescindível para a promoção do desenvolvimento sustentável. Além disso, a disponibilidade restrita dos tradicionais combustíveis fósseis faz do desenvolvimento e aplicação de tecnologias que permitam o uso de fontes renováveis em grande escala um dos grandes desafios deste século, como previsto pelo Protocolo de Kyoto em 1997 (DUNLAP, 2015).

O sistema de fornecimento elétrico do Brasil mostrou-se vulnerável à falta de eletricidade e exigiu uma revisão significativa para enfrentar seus desafios (Silva et al., 2016).

Entre os maiores incentivos à geração de energia solar no Brasil está a regulamentação sobre a microgeração residencial, estabelecida pela ANEEL em 2012. Esta regulamentação permite que qualquer residência possua painéis solares

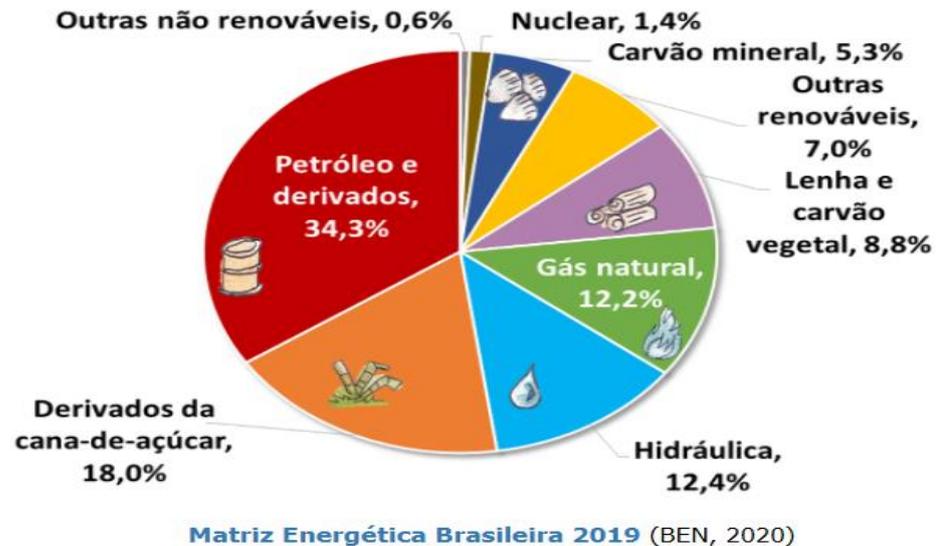
que possam ser utilizados como forma de geração autônoma de energia. Isso não apenas reduz o consumo de energia obtido através da distribuidora, mas em horários de pico de produção energética, ainda pode devolver energia à rede de distribuição (ANEEL, 2012). A tecnologia da geração de energia solar ou fotovoltaica tem sido cada vez mais considerada em muitos países como uma alternativa para reduzir os impactos ambientais associados às mudanças climáticas e à dependência de combustíveis fósseis. Países como a Alemanha desenvolveram mecanismos regulatórios específicos para incentivar seu uso, seja por programas governamentais ou por incentivos financeiros e/ou fiscais. Entretanto, apesar do grande potencial solar existente no Brasil, o incentivo à tecnologia ainda é incipiente (FERREIRA et al., 2018). A irradiação solar no Brasil é favorável à geração de eletricidade, mas essa fonte de energia ainda representa menos de 0,1% da matriz energética brasileira (PINTO et al., 2016).

Energia solar é aquela proveniente do Sol (energia térmica e luminosa). Esta energia é captada por painéis solares, formados por células fotovoltaicas, e transformada em energia elétrica ou mecânica. A energia solar também é utilizada, principalmente em residências, para o aquecimento da água. A energia solar é considerada uma fonte de energia limpa e renovável, pois não polui o meio ambiente e não acaba. A energia solar ainda é pouco utilizada no mundo, pois o custo de fabricação e instalação dos painéis solares ainda é muito elevado. Outro problema é a dificuldade de armazenamento da energia solar (LAVEZZO, 2016).

O Brasil é uma economia independente, e o crescimento econômico é crucial para fornecer os recursos necessários para seu desenvolvimento energético sustentável. A expansão da geração de energia proveniente de fontes renováveis não só aumentaria o crescimento econômico do país e travaria a deterioração do meio ambiente, mas também criaria uma oportunidade para um papel de liderança no sistema internacional e melhoraria a concorrência do Brasil com países mais desenvolvidos (PAO E FU, 2018).

O Brasil é um país privilegiado, com sua enorme biodiversidade e localização geográfica e a exploração de praticamente todos os tipos de energias renováveis como hidrelétrica, eólica e solar, ganha um espaço cada vez maior na sua matriz energética, como mostra o gráfico a seguir (Figura 1).

Figura 1: Matriz energética brasileira 2019.



Fonte: EPE (2020)

A matriz energética do Brasil é muito diferente da mundial. Por aqui, apesar do consumo de energia de fontes não renováveis ser maior do que o de renováveis, usamos mais fontes renováveis que no resto do mundo. Somando lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana e outras renováveis, nossas renováveis totalizam 46,2%, quase metade da nossa matriz energética (EPE, 2019).

A participação das hidroelétricas na matriz elétrica brasileira torna o sistema elétrico brasileiro singular no que tange aos aspectos de impactos ambientais e emissões de gases de efeito estufa. No entanto, a hidroeletricidade, assim como todas as fontes renováveis de energia, está sujeita à influência de fatores climáticos de modo que a energia armazenada (representada pelo nível de água acumulada no reservatório) em períodos de seca pode atingir valores críticos sob o ponto de vista de segurança energética. Com esse recurso natural escasso, a oferta de energia diminui, induzindo o crescimento do risco ao sistema energético e acarretando elevação dos preços da energia no país (PEREIRA et al., 2020).

4 MATERIAL E MÉTODOS

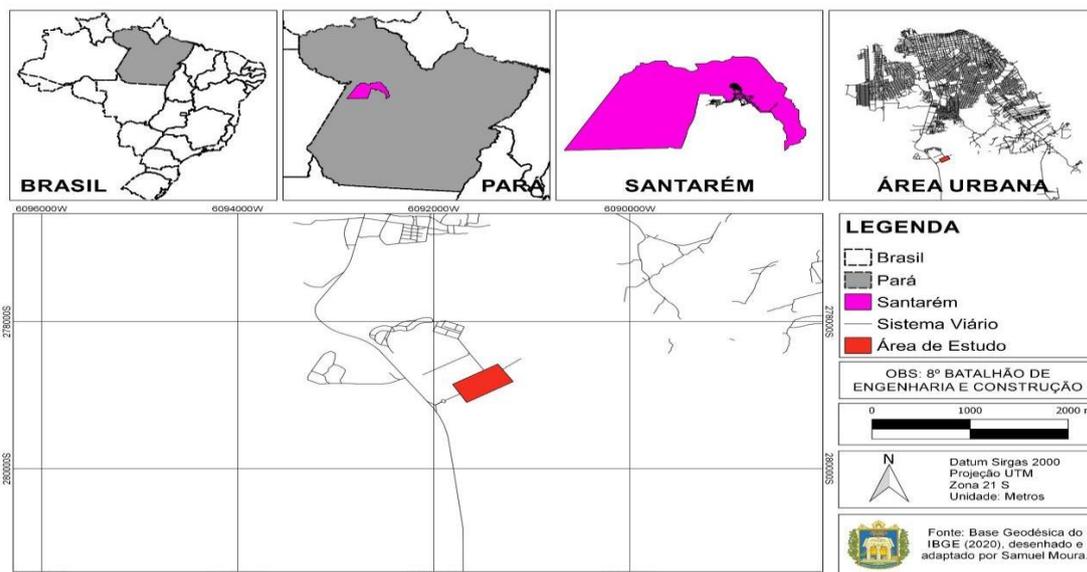
4.1 Área de estudo

O município de Santarém-PA, está sob a influência do clima tropical úmido, com variação térmica anual inferior a 5% e precipitação média anual em torno de 1820 mm (classe Ami conforme sistema Köppen) (OLIVEIRA et al., 2020). A umidade relativa do ar apresenta valores superiores a 80% em quase todos os meses do ano

(COSTA et al, 2013). São definidos dois períodos, um chuvoso e outro menos chuvoso ou seco. O chuvoso coincide com os meses de dezembro a junho e o seco com os meses de julho a novembro, a mediana da precipitação pluvial fica em torno de 50 mm e o número de dias com chuva em torno de 5 dias (OLIVEIRA et al., 2020). As temperaturas mais elevadas ocorrem nos meses de junho a novembro (IBGE, 2021).

Realizou-se a pesquisa a partir da base de dados da estação meteorológica automática de superfície de Santarém-PA. A estação meteorológica de Santarém, localiza-se no planalto santareno, especificamente no 8º Batalhão de Engenharia e Construção (BEC), na Rodovia Santarém-Cuiabá, BR 163, KM 10, Cipoal (Figura 1).

Figura 2: Mapa de localização da Estação Meteorológica de Santarém-PA.



Fonte: IBGE (2020) Adaptado por Samuel Moura.

Os dados de radiação solar global utilizados neste estudo foram obtidos por piranômetros fotodiódos de silício, utilizados para mensurar a radiação gerando sinais elétricos do tipo analógico, os quais são transformados pelo sistema em unidade de radiação (W/m^2).

4.2 Análise de Dados

Os dados foram obtidos através da estação meteorológica automática de Santarém-PA e as informações foram extraídas do Sistema de Informações Hidro-Meteorológica (SIM) do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. O arquivo contém cabeçalho do mapa/INMET e coordenadas geográficas da estação meteorológica automática de Santarém-PA. O fuso horário de referência é UTC (Coordinated

Universal Time - Tempo Universal Coordenado), a partir do qual se calculam todas as outras zonas horárias do mundo, então se fez necessário subtrair 3 h para transformar para hora local.

As estações meteorológicas automáticas do INMET, tem por finalidade estudos meteorológicos e monitoramento ambiental. E se fazem presentes em pôr todo o território nacional (PEREIRA et al. 2020).

Foram utilizados os dados de radiação solar global horária de 06 h (9 UTC) às 18 h (21 UTC). Para calcular a radiação solar global mensal e anual, foram utilizados dados de todos os meses, conseqüentemente, aplicou-se o cálculo de média aritmética, o período de dados de radiação solar global utilizado neste estudo foi de 2015 a 2018, série histórica da estação meteorológica que ficou inoperante desde 2019. Os valores negativos de radiação solar global, assim como os horários em que não há incidência de luz solar, foram descartados. As análises dos dados, tabelas e gráficos foram gerados utilizando o software Microsoft Excel 2019, versão 16.0, que nos auxiliaram para melhor compreensão da pesquisa e explicação dos resultados.

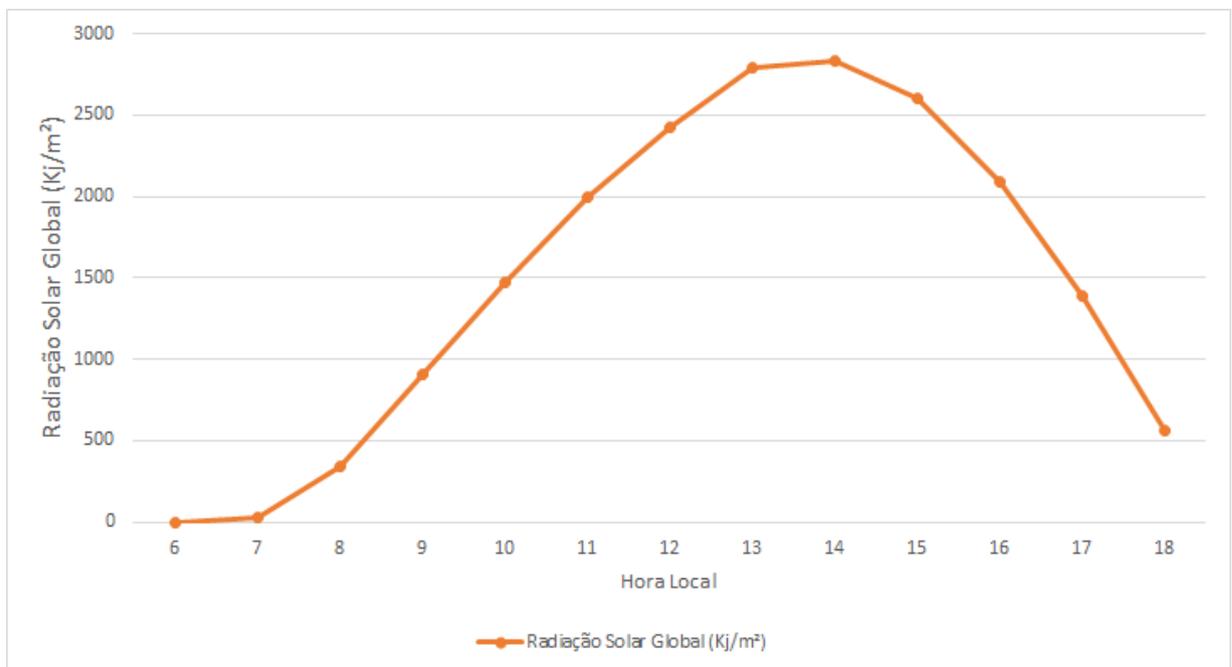
Os dados de geração de energia solar fotovoltaica, compreendidos entre os meses de maio de 2015 a julho de 2021, foram cedidos pela equipe de monitoramento, do departamento de ciências e tecnologia de uma empresa local de energia solar fotovoltaica. Estes dados são de geração de energia solar de uma empresa na área de educação localizada no bairro Rodagem em Santarém-PA.

Para testar a correlação entre a radiação solar global e a produção de energia fotovoltaica, foi utilizado a correlação de Pearson, que teve o objetivo de indicar como as duas variáveis associadas estão entre si. Adotou-se $p \leq 0,05$ como nível de significância, em seguida, plotou-se o gráfico de correlação. Para avaliar a perda de produtividade (%) na geração de energia fotovoltaica nos meses de menor e maior geração de energia foi calculada a média anual de produção de energia, em seguida, foi utilizada uma regra de três simples. Assim, foi possível saber quanto em porcentagem perde de eficiência no período chuvoso e quanto aumenta eficiência no período seco.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise da radiação solar global horária, foi possível identificar que às 8 h a radiação solar é relativamente baixa, não chegando a ultrapassar 500 Kj/m^2 (Figura 3). Os horários de maior pico de incidência de radiação solar, são as 14 h, com 2.836 Kj/m^2 . Os horários de 14h às 16h, concentram os maiores índices de radiação, que coincide com a pesquisa de (PEREIRA et al., 2017), onde nesses horários há uma maior disponibilidade de radiação solar para geração de energia fotovoltaica (Figura 3).

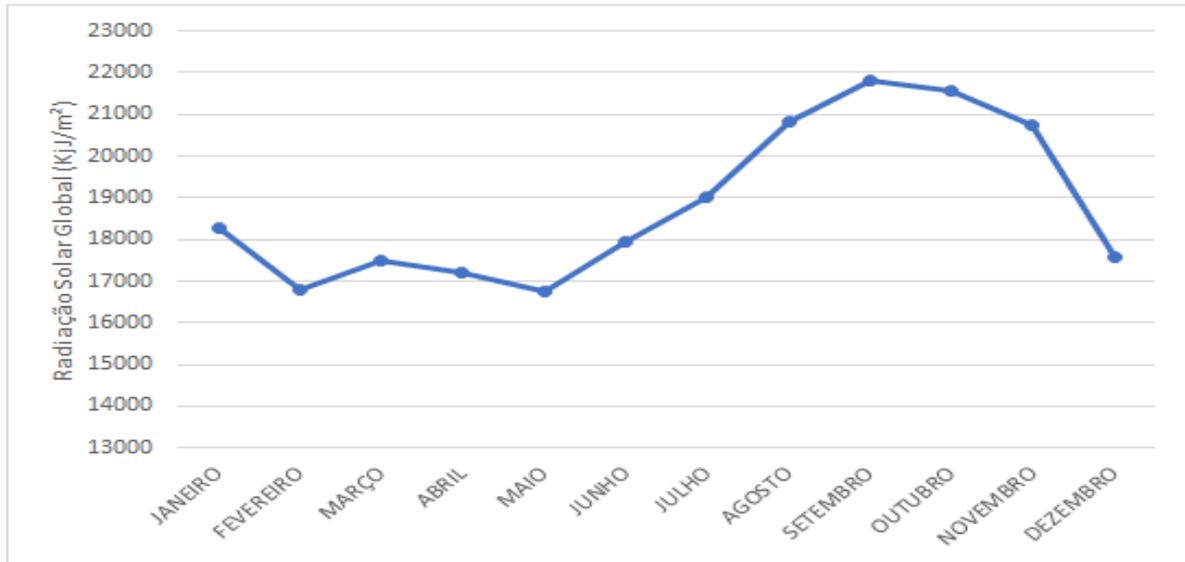
Figura 3: Radiação Solar Global horária para Santarém-PA para o período de setembro 2015 a dezembro 2018.



Fonte: Autora (2021)

Os meses de setembro e outubro (período seco), concentram os maiores índices de radiação solar com 21.796 e 21.556 Kj/m^2 (Figura 4), respectivamente, o que eventualmente pode estar relacionado com a proximidade com o Equador, onde a incidência de radiação solar é máxima (MARQUES, 2012). Os meses de fevereiro e maio, possuem os menores índices de radiação solar, com 16.813 e 18.281 Kj/m^2 , para o período chuvoso (Figura 4).

Figura 4: Radiação Solar Global mensal em Santarém-PA para o período de setembro 2015 a dezembro 2018.

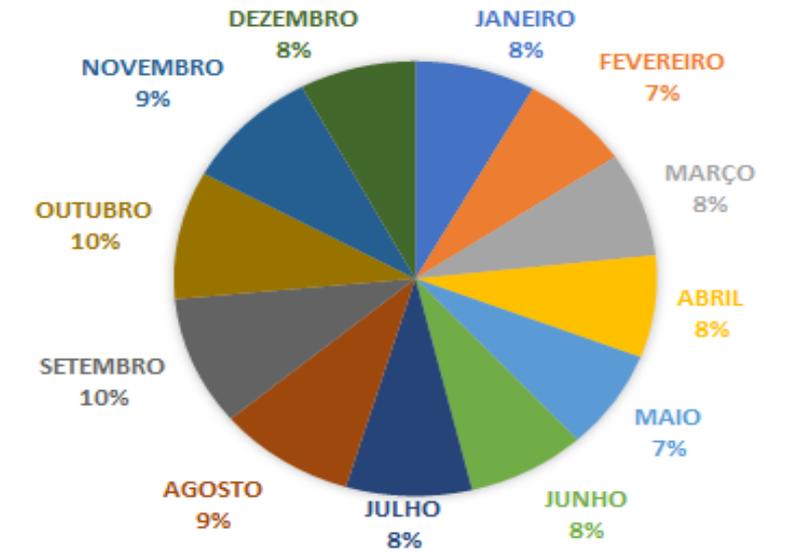


fonte: Autora (2021)

No município de Santarém os meses de junho a novembro, compreendem os meses de verão amazônico, com índices de radiação solar global maiores que os meses de inverno amazônico, compreendidos entre dezembro à junho. Entre os meses de setembro (verão amazônico) e maio (inverno amazônico), maior e menor taxa de radiação solar global, respectivamente, temos um diferencial de perda de 5.056 Kj/m².

Nota-se que os meses de setembro e outubro totalizaram um percentual de 20% de radiação solar, enquanto junho e julho, juntos somam 16%, o menor percentual para época de verão amazônico. Por outro lado, dezembro, janeiro, março e abril, tiveram um percentual de 32% de radiação solar, o maior para o período de inverno amazônico. Fevereiro e maio totalizaram 14%, o que é normal já que a umidade ascendente presente no período de chuvas, favorece a formação de nuvens, e a radiação solar difusa dificulta que os raios solares cheguem à superfície (MARQUES, 2012) (Figura 5).

Figura 5: Porcentagem de distribuição da radiação solar global anual em Santarém-PA para o período de setembro 2015 a dezembro de 2018.

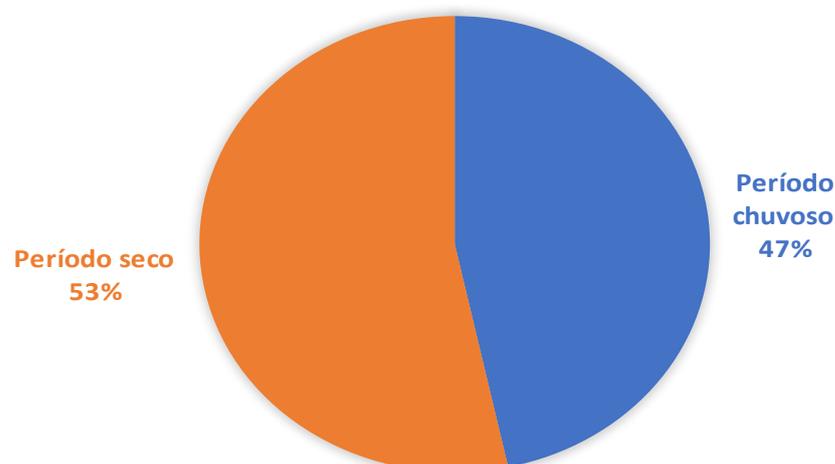


Fonte: Autora (2021)

Setembro e outubro, foram os meses de maior percentual de radiação solar, somando 20%. Fevereiro e maio, com menor percentual de radiação solar, totalizando 14%. No geral, se tem uma perda de apenas 7% de radiação solar global.

Observa-se que para o período de regime de chuvas, a radiação solar global totaliza 53%, entre os meses de junho a novembro e 47% no período chuvoso nos meses de dezembro a maio, ocorrendo um decréscimo natural, uma vez que, mesmo estando próximo ao Equador a nebulosidade prevista para este período chuvoso e baixa incidência de radiação é inevitável (CAMPOS et al., 2016) (Figura 6).

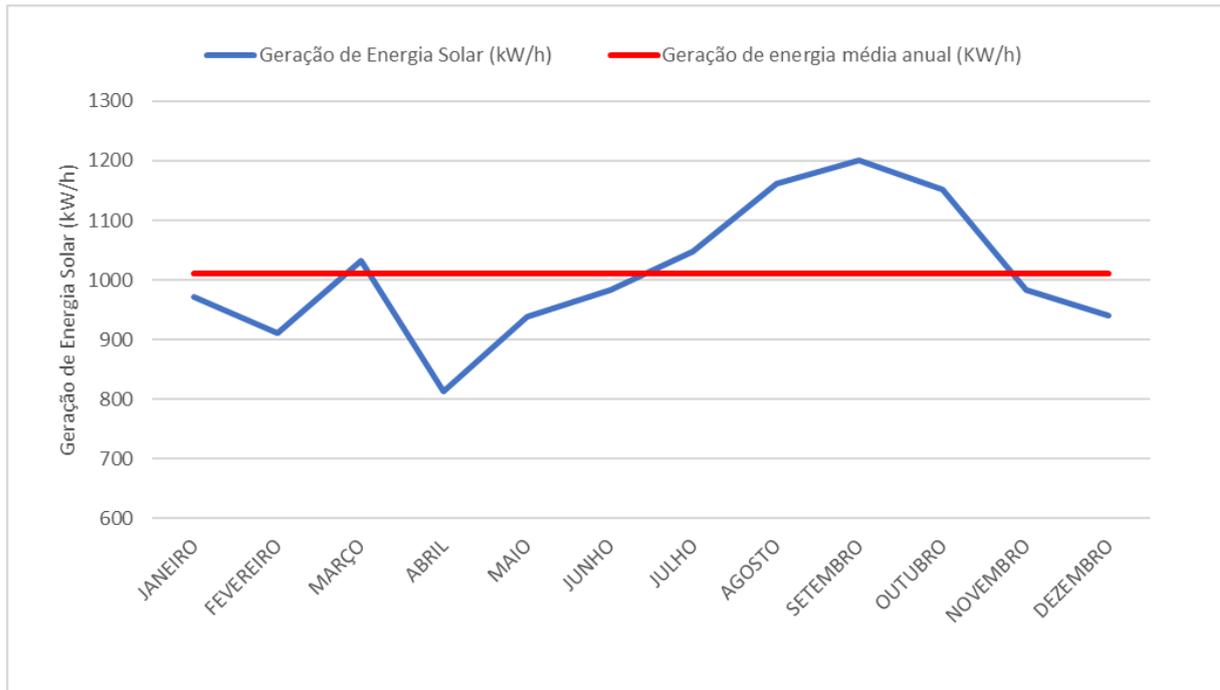
Figura 6: Distribuição da radiação solar global mensal para os períodos seco (junho a novembro) e chuvoso (dezembro a maio), para o período de setembro 2015 a dezembro 2018.



Fonte: Autora (2021)

O mês de setembro a geração de energia fotovoltaica é de 1.200 kW/h, atingindo o máximo de geração para o período seco (Figura 7). Os meses de agosto a outubro, registraram índices acima da média (1.011kW/h), acima de 1.100 kW/h de geração de energia solar.

Figura 7: Geração de Energia Solar Fotovoltaica, para os períodos de abril de 2018 a julho de 2021.



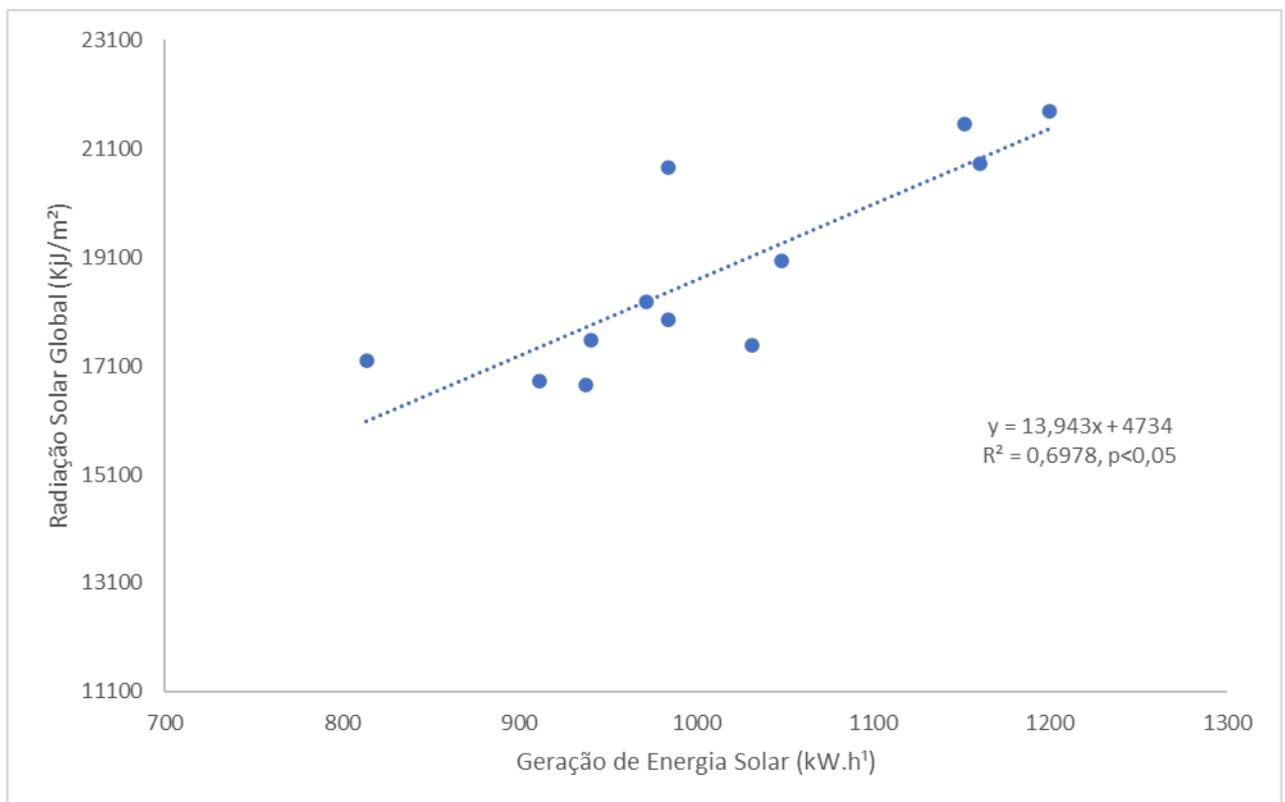
Fonte: Autora (2021)

Dezembro e maio, possuem valores próximos de geração de energia solar, de 941 kW/h e 938 kW/h, respectivamente. Os meses sucessivos, temos março, com geração de 1.032 kW/h para este período chuvoso e menor pico de geração em abril, com 814 kW/h. O mês de janeiro registra o segundo maior índice geração de energia solar com 972 kW/h (Figura 7).

Deste modo, se pegarmos a média de geração de energia solar 1.011 kW/h e compararmos com mês de setembro, onde se teve a maior geração de energia solar fotovoltaica 1.200kW/h, chegamos ao percentual de 118%, 18% a mais geração do que o esperado. Toda via, para o mês de abril que teve 814 kW/h, com uma perda de 22% na geração de energia fotovoltaica. Não podemos esquecer que do mês de junho a novembro, há uma diminuição das chuvas e os valores de radiação solar global são maiores, quando comparadas com os meses de dezembro a maio, onde as chuvas se intensificam e a radiação solar que chega superfície terrestre é difusa.

A radiação solar global e geração de energia solar fotovoltaica, foram correlacionados para melhor visualização dos resultados. Houve uma correlação estatisticamente significativa entre as variáveis ($R=0,70$; $p<0,05$) uma relação de dependência de 70%, ou seja, as variáveis simuladas e medidas estão fortemente correlacionadas acompanhando a tendência de variação da outra (CAMPOS, 2016), quanto maior a radiação solar, maior será a geração de energia fotovoltaica, assim como, quanto menor for o índice de radiação solar, menor será a geração energia. (Figura 8).

Figura 8: Correlação da radiação solar global, com a geração de energia solar fotovoltaica, para os períodos de abril de 2018 a julho de 2021.



Fonte: Autora (2021)

Quando a radiação solar global atingiu 21.796 Kj/m², para o mês de setembro, simultaneamente a produção de energia solar fotovoltaica também atingiu seu máximo com 1.200 kW/h, assim, nos momentos em que os índices de radiação se elevarem e atingirem o seu máximo, a geração de energia solar também atingirá seu pico de geração, podendo está também ser um fator limitante (KAUFMMAN, 2014). Assim

como, para o mês de abril a radiação solar global foi de 17.207 KJ/m², a produção de energia foi de 814 kW/h (Figura 8).

Entretanto, o mês de fevereiro apresentou o menor índice de radiação solar global com 16.813 KJ/m² e uma produção de energia solar de 911KJ/m², ultrapassando o mês de abril, que teve uma radiação solar global superior. Neste caso, temos que levar em consideração que os seguintes fatores: a estação de meteorológica, fica localizada no 8° BEC planalto santareno e as placas solares próximo ao centro urbano da cidade. o mês de setembro está compreendido no período seco (verão amazônico) e o mês de abril, está dentro do período chuvoso (inverno amazônico), o que é comum a formação de nuvens de precipitação/nebulosidade para a cidade de Santarém-PA. Outro fator, muito relevante é a mudança de tempo durante o dia, alterando a irradiância solar e temperatura do painel solar fotovoltaico (principalmente os que possuem coloração mais escura), afetando seu desempenho. De modo que a temperatura da célula aumenta e a corrente do circuito também, a potência máxima, a tensão do circuito aberto e o fator de preenchimento, diminuem (SOUZA et al., 2018)

De fato, a cidade de Santarém-PA, possui meses com maior incidência solar e, os meses de julho a outubro, ficaram acima da média anual de geração de energia solar fotovoltaica, totalizando 4.560 kW/h (Figura 7). Janeiro, fevereiro, abril, maio, são os meses que ficaram abaixo da média de geração de energia solar fotovoltaica com um quantitativo de 3.635 kW/h. Vale salientar que o microclima urbano local, na cidade de Santarém-PA, sofre influência da evaporação dos rios e da transpiração da floresta amazônica ocasionando que em um dia totalmente nublado, não haja radiação direta, e sim 100% de radiação difusa. E mesmo num dia totalmente sem nuvens, pelo menos 20% da radiação que atinja a superfície seja difusa (CAPO, 2018).

A geração de energia solar está diretamente relacionada a sazonalidade da radiação solar global (Figura 8). Isso mostra que a potência gerada por um sistema fotovoltaico está diretamente ligada a intensidade de radiação. Para uma geração de energia solar média 1.011 kW/h, no período chuvoso há uma perda de produção de até 22% (abril) na geração de energia fotovoltaica. A eficiência na geração de energia diminui no período seco até 22%.

Desta forma, a radiação solar global mensal é capaz de gerar energia solar fotovoltaica o ano todo para a cidade de Santarém-PA, com perdas mínimas de geração nos diferentes períodos sazonais. Assim com os horários de maior incidência solar que coincidem com a maiores de taxas de geração de energia. Empreendimento

como escolas, lojas e até mesmo residências que consomem até 700 kW/h por mês, seria um excelente investimento, sem contar no custo-benefício social e ambiental.

Entretanto, alguns dados ainda precisam ser gerados e estudados, uma vez que a estação meteorológica de Santarém-PA é recente, e alguns problemas, como pane, dificultaram a coleta de mais dados anuais. Logo em seguida, a pandemia da Covid-19 dificultou que alguns destes problemas fossem resolvidos tão logo. Igualmente os dados de geração de energia solar fotovoltaica, que não correspondem com o mesmo período estudado por falta deles, uma vez que as empresas existentes na cidade de Santarém-PA, são recentes e os inversores até então utilizados não eram capazes de armazenar informações, quando ocorriam problemas técnicos nas placas solares.

Ainda há muito o que estudar, a cidade de Santarém-PA compõe uma pequena parcela do território oeste paraense o qual ainda não sabemos quantas mais destas cidades tem o mesmo potencial de radiação solar global para a geração de energia solar fotovoltaica, ou outros sistemas como de aquecimento de água por exemplo, que necessitem diretamente da luz solar. Assim como, o desenvolvimento de painéis solares que sejam financeiramente mais econômicos e sustentáveis. Uma vez que, o silício que é a matéria base para a construção destes sistemas e ao ser explorado, agride significativamente o meio ambiente.

6. CONCLUSÃO

A cidade de Santarém-PA mostrou um grande potencial de radiação solar global, com sua sazonalidade bem definida entre o período de inverno e verão amazônico, com uma perda mínima de geração de energia solar de 22% para o período chuvoso, com radiação solar bem distribuída durante todos os meses do ano e horários do dia, com picos de geração de energia solar, suficientes para investimentos em sistemas fotovoltaicos.

Entretanto, é de extrema importância o uso de dados de radiação solar global de fontes confiáveis, para caracterização de sua sazonalidade, assim como seus horários de maior incidência, gerando dados para uma análise qualitativa, possibilitando que essas informações sejam agregadas para o planejamento e instalações de sistemas fotovoltaicos eficientes que possam captar energia solar, o ano inteiro.

Portanto, a comunidade não só científica, mas todos os indivíduos possam ter acesso ao ensino e tecnologias de qualidade para que obtenham conhecimento acerca dos problemas ambientais e principalmente fontes de energias sustentáveis visto que, muitas pessoas ainda não compreendem a importância e a viabilidade econômica e ambiental de se ter uma fonte de energia inesgotável e sustentável como a energia solar fotovoltaica, tendo um potencial de radiação solar global bem distribuído em todos os meses do ano para Santarém-PA.

Para estudos futuros, sugerimos a caracterização da radiação solar e sua sazonalidade e o potencial de geração solar para construção de miniusinas solares fotovoltaicas ou até mesmo uma análise mais detalhada de irradiação solar difusa e o potencial de geração de energia solar fotovoltaica, utilizando dados confiáveis das estações meteorológicas de cidades do oeste paraense.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL. (2012) Resolução Normativa Nº 482. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasil. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso:03 set. 2018.
- AYOADE, J. O. **Introduction to climatology for the tropics**. Chichester: John Wiley & Sons, 1983.
- BELÚCIO, L. P.; SILVA, A. P. N.; SOUZA, L. R.; MOURA, G. B. de A. Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 494-504, 2014.
- BEZERRA, F. D. Energia solar. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n.174, jul. 2021. (Caderno Setorial Etene).
- BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **Interciencia**, v. 43, n. 10, p. 680-688, 2018.
- BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO FILHO, M. A.; SILVA, T. S. M.; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 74-80, 2010.
- CAPO, P. I. M. **Desenvolvimento de uma ferramenta para previsão de curto prazo da radiação solar utilizando redes neurais artificiais**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Curso de Energia e Sustentabilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá. 2018.

CAMPOS, M. S.; ALCANTARA, L. D. S. Interpretação dos efeitos de tempo nublado e chuvoso sobre a radiação solar em Belém/PA para uso em sistemas fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 570-579, 2016.

COSTA, A.C.L.; UCHOA, P.W.; JUNIOR, J.A.S.; CUNHA, A.C.; FEITOSA, J.R.P. Variações termo-higrométricas e influências de processo de expansão urbana em cidade equatorial de médio porte. **Brazilian Geographical Journal**, Ituiutaba, v. 4, n. 2, p. 615-632, 2013.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar engineering of thermal process. **A Wiley-Interscience Publication**, Estados Unidos da América, v. 2, 2013.

DUNLAP, R.A. Sustainable energy. Halifax: Dalhousie University, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA EPE. Matriz energética brasileira. BRASIL. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso: 05 ago 2021.

FARIAS, L. M.; SELITTO, M. A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato** (Novo Hamburgo), v. 12, p. 7/21788820-16, 2011.

FERREIRA A.; KUHN S.S.; FAGNANI K.C.2018. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81: 181-191.

GACIA, P. D. FOTOVOLTAICA, **Uma visão sobre energia**. DEELT-UFMG. Belo Horizonte, 1995.

HARTMANN, D. L. Global physical climatology. Seattle: Academic Press, 1994.
HÉMERY, D. **Uma história da energia**. UnB, 1993.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Dados do Estado do Pará. Brasília: Ministério da Economia, 2021.

IEA. Key World Energy Statistics. OECD Publishing, 2017. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>. Acesso em: 30 jul 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. Brasil. 2018 Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/municipio/150680>. Acesso: 03 jun. 2021.

KAUFMANN, Gustavo Vinícius. Avaliação do potencial de geração solar fotovoltaica e análise em tempo real da operação de um painel fotovoltaico instalado na cidade de Lajeado/RS. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso.

LAGRIMANTE, D. M. Estudo da aplicação de energia fotovoltaica. **Revista Pesquisa e Ação**, v. 4, n. 1, p. 162-170, 2018.

LAVEZZO, C. A. L. Fontes de energia. **Revista Eletrônica Gestão em Foco**, Amparo, p. 102 a 126, 2016.

LOHMANN, S.; SCHILLINGS, C.; MAYER, B.; MEYER, R. Long-term variability of solar direct and global radiation derived from ISCCP data and comparison with reanalysis data. **Solar Energy**, v.80, n.11, p.1390-1401, 2006.

MARQUES, D.; BRITO, U. A.; CUNHA, A. C.; SOUZA, L. R. Variação da radiação solar no estado do Amapá: estudo de caso em Macapá, Pacuí, Serra do Navio e Oiapoque no período de 2006 a 2008. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p. 127-138, 2012.

MELO, C.A.; JANUZZI G de M.; BAJAY S.V.; 2018. Nonconventional renewable energy governance in Brazil: Lessons to learn from the German experience. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 61: 222-234.

NASCIMENTO, L. L. Caracterização fotoeletroquímica de dispositivos para conversão de energia solar. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Química Industrial) – Universidade Federal de Uberlândia.2018.

OLIVEIRA, L. L.; BARRETO, N. J. C.; JESUS, E. S.; CANANI, L. G. C. Efeitos dos eventos extremos climáticos na variabilidade hidrológica em um rio de Ecossistema Tropical Amazônico. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, Aracajú, v.11, n.4, p.145-153, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.004.0013>.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, S. R.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: Inpe, v. 1, 2017.

SILVA, R.C.; de MARCHI N.; SEIFERT, S.S. 2016 Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 59: 328-341.

SOUZA, A.; ARISTONE, F.. Um estudo da temperatura e da irradiação solar em células fotovoltaicas. **Tecno-Lógica**, v. 22, n. 2, p. 194-200, 2018