

ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO FOTOVOLTAICO DAS CAPITAIS DOS ESTADOS DO SUL DO BRASIL

Paula Carvalho da **Silveira**¹, Jaqueline Prestes de **Cristo**², Claudia Guimarães Camargo **Campos**³, Daiana Petry **Rufato**⁴

(1 – Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), paulacarvalho.9912@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0751-4069>, 2 – Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), jaqueline.cristo@edu.udesc.br, <https://orcid.org/0000-0002-0670-8240>, 3 - Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), claudia.campos@udesc.br, <https://orcid.org/0000-0001-5010-1895>, 4 - Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), daiana.petry@udesc.br, <https://orcid.org/0000-0003-0541-3253>)

Resumo: A substituição do uso de energias não renováveis por energias limpas vem crescendo com o passar dos anos. O uso da energia solar a partir de placas fotovoltaicas apresenta-se como uma solução simples e com elevado potencial de produção, porém está diretamente relacionado com as condições geográficas do local, através da radiação solar incidente e a temperatura do ar. O estudo tem como objetivo determinar a produção energética de módulos fotovoltaicos nas capitais do Sul do Brasil (Curitiba, Florianópolis e Porto Alegre) a fim de comparar com a produção gerada na cidade de Calama, no Chile, uma vez que esta cidade apresenta um enorme potencial instalado. A metodologia utilizada foi baseada em uma sequência de equações que resultaram na produção energética referente a um módulo fotovoltaico para todas as cidades analisadas. Os resultados demonstraram que apesar de Calama representar a maior produção energética solar atualmente, as demais cidades demonstraram um comportamento semelhante. Foi observado uma grande variação sazonal devido ao movimento solar, o que impacta diretamente na produção energética dos meses de inverno principalmente. Conclui-se que utilização de um sistema híbrido melhor se enquadra em situações como a apresentada, em que é possível utilizar diferentes tipos de fontes de energia de forma conjunta, assegurando uma otimização de produção durante períodos de menor incidência solar.

Palavras-chave: Energia Solar; Módulos Fotovoltaicos; Radiação Solar; Temperatura do Ar

STUDY OF THE PHOTOVOLTAIC ENERGY POTENTIAL OF THE CAPITALS OF THE SOUTHERN STATES OF BRAZIL

Abstract: The replacement of the use of non-renewable energy with clean energy has been growing over the years. The use of solar energy from photovoltaic panels presents itself as a simple solution with high production potential, however it is directly related to the geographical conditions of the location, through incident solar radiation and air temperature. The study aims to determine the energy production of photovoltaic modules in the capitals of southern Brazil (Curitiba, Florianópolis and Porto Alegre) in order to compare it with the production generated in the city of Calama, in Chile, since this city has enormous installed potential. The methodology used was based on a sequence of equations that resulted in energy production related to a photovoltaic module for all cities analyzed. The results demonstrated that although Calama currently represents the largest solar energy production, the other cities demonstrated similar behavior. A large seasonal variation was observed due to solar movement, which directly impacts energy production in the winter months, especially. It is concluded that the use of a hybrid system is best suited to situations such as the one presented, in which it is possible to use different types of energy sources together, where the benefits of both are used, ensuring production optimization during periods of lower solar incidence, as observed in winter.

Keywords: Solar Energy; Photovoltaic Modules; Solar Radiation; Air Temperature

ESTUDIO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO FOTOVOLTAICO DE LAS CAPITALES DE LOS ESTADOS DEL SUR DE BRASIL

Resumen: La sustitución del uso de energías no renovables por energías limpias ha ido creciendo con el paso de los años. El aprovechamiento de la energía solar procedente de paneles fotovoltaicos se presenta como una solución sencilla y con un alto potencial de producción, sin embargo está directamente relacionada con las condiciones geográficas del lugar, a través de la radiación solar incidente y la temperatura del aire. El estudio tiene como objetivo determinar la producción energética de módulos fotovoltaicos en las capitales del sur de Brasil (Curitiba, Florianópolis y Porto Alegre) para compararla con la producción generada en la ciudad de

Calama, en Chile, ya que esta ciudad tiene un enorme potencial instalado. La metodología utilizada se basó en una secuencia de ecuaciones que dieron como resultado la producción de energía relacionada con un módulo fotovoltaico para todas las ciudades analizadas. Los resultados demostraron que si bien Calama representa actualmente la mayor producción de energía solar, las demás ciudades demostraron un comportamiento similar. Se observó una gran variación estacional debido al movimiento solar, que impacta directamente en la producción de energía en los meses de invierno, especialmente. Se concluye que el uso de un sistema híbrido se adapta mejor a situaciones como la presentada, en las que es posible utilizar diferentes tipos de fuentes de energía en conjunto, donde se aprovechan los beneficios de ambas, asegurando la optimización de la producción durante períodos de menor demanda Incidencia solar, como se observa en invierno.

Palabras clave: Energía solar; Módulos Fotovoltaicos; Radiación solar; Temperatura del aire

1 Introdução

O grande crescimento populacional e econômico influenciou de maneira significativa o consumo de energia nos últimos tempos, como consequência, muitos países têm enfrentado graves problemas de esgotamento de energia e degradação ambiental (Jeelani et al., 2022; Qian et al., 2017; Azizi et al., 2023). Como um meio de solucionar esses problemas, gestores públicos de diversos países estão adotando a transição dos combustíveis fósseis para o uso de energias verdes (energias renováveis), a fim de reduzir os impactos ambientais gerados pelas emissões de gases ao meio ambiente (Azizi et al., 2023).

As energias renováveis são fontes que se utilizam de recursos da natureza, capazes de se regenerarem (auto-renováveis) como a água, luz do sol, biomassa, vento e calor geotérmico (Alawad et al., 2023; Teixeira; Pessoa, 2022; Araújo et al., 2022). As energias renováveis podem ser utilizadas em processos de aquecimento/resfriamento de água e ar, além disso, podem atuar na geração de eletricidade (Alawad et al., 2023; Zaragoza; Andrés-Mañase e Ruiz-Aguirre, 2018). De acordo com estimativas de 2022 a 2027, a Agência Internacional de Energia (IEA, 2022), publicou em seu Relatório Renováveis 2022, que as energias renováveis são as únicas fontes de geração de energia elétrica que apresentam tendência de crescimento nos próximos anos. Dentre essas fontes, a energia eólica e solar fotovoltaica se sobressaem, com

estimativas de que o fornecimento de energia chegue a quase 20% da geração global de energia em 2027.

A energia solar é considerada uma excelente alternativa para o fornecimento de energia elétrica, por ser uma fonte renovável, limpa, confiável e abundante. Além disso, sua instalação em pequenas escalas não necessita de grandes investimentos voltados para linhas de transmissão e muitos dos sistemas fotovoltaicos estão conectados à rede (Silva; Carmo, 2017; Jeelani et al., 2022; Qian et al., 2017; Silva; Araújo, 2022). Esse tipo de energia é obtido através da conversão da radiação solar de ondas curtas que atinge a superfície do sistema coletor, em eletricidade.

Na América Latina, o uso de energia fotovoltaica ganhando espaço, com destaque para Brasil, México, Chile e Argentina. O Deserto do Atacama, localizado no Chile, tornou-se um polo de geração de energia fotovoltaica devido à instalação da primeira usina termossolar da América Latina, denominada Cerro Dominador. A localização apresenta características determinantes do recurso solar, que influenciam nas taxas de radiação, como: latitude favorável, elevada altitude média, grande número de dias com céu claro e baixa absorção de colunas de vapor d'água e de ozônio (Ferrada et al., 2017). Tais características permitem que o local receba um dos maiores níveis de radiação do planeta terra, com uma irradiação horizontal global acima de 2500 kWh/(m²·ano) (Correa-Puerta et al., 2021).

O Brasil possui um grande potencial de capacidade de energia fotovoltaica, pela sua localização geográfica (quase inteiramente na zona tropical), o que permite ao país receber altos índices de radiação solar e relativamente distribuída em todo o território brasileiro, favorecendo implantações de projetos solares em diferentes regiões (EPE, 2020).

Ainda, de acordo com EPE (2020), é notável que todas as regiões do país, apresentam níveis médios de radiação solar horizontal global muito superiores aos de países europeus, como a França, Alemanha e Espanha. No entanto, a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica nestes países é muito superior à do Brasil devido à falta de investimento no país (Santos; Lucena, 2021).

De acordo com Irena (2020), a capacidade de geração de energia solar fotovoltaica no Brasil é de 24.079 GW, e no Chile, 6.142 GW. Apesar do Brasil apresentar um potencial de capacidade de geração muito maior, ainda não existe um investimento representativo nesse tipo de energia. Considerando este contexto, o presente estudo tem como objetivo determinar a produção energética de módulos fotovoltaicos nas capitais do Sul do Brasil (Curitiba,

Florianópolis e Porto Alegre) a fim de comparar com a produção gerada na cidade de Calama, cidade onde a Usina Cerro Dominador está instalada.

2 Materiais e métodos

2.1 Área de Estudo

As cidades escolhidas para o estudo foram Calama, capital da província de El Loa, localizada na Região de Antofagasta, Chile e as capitais dos estados da região Sul do Brasil - Curitiba, Florianópolis e Porto Alegre (Figura 1). A escolha dessas localidades foi realizada uma vez que o Deserto do Atacama, onde localiza-se a cidade de Calama, possui o parque fotovoltaico de maior produção de energia da América Latina, e por apresentar fatores geográficos semelhantes com a região Sul do Brasil. Por essa razão, foram selecionadas as capitais de cada estado da região sul do Brasil, para analisar o potencial de energia fotovoltaica e o comparativo entre elas e a cidade de Calama. Embora apresentem características climáticas diferenciadas, essas localidades são referências de cada estado, com elevado desenvolvimento econômico e população abrangente, porém, não constam com muitos investimentos com instalações de painéis fotovoltaicos.

O Deserto de Atacama fica localizado na cidade de Calama, com latitude $-22,66^\circ$ e longitude $-69,40^\circ$. Possui um clima considerado BWk, desértico frio, com baixa umidade relativa (o que influencia para que haja grande secura atmosférica), na região ocorrem fortes oscilações térmicas e ausência de precipitação (Aguirre, 2012). De acordo com último censo de 2012, a cidade conta com 137.153 habitantes, está localizada na direção da cordilheira dos Andes, nas margens do rio Loa (Ruiz; Abarzúa, 2012).

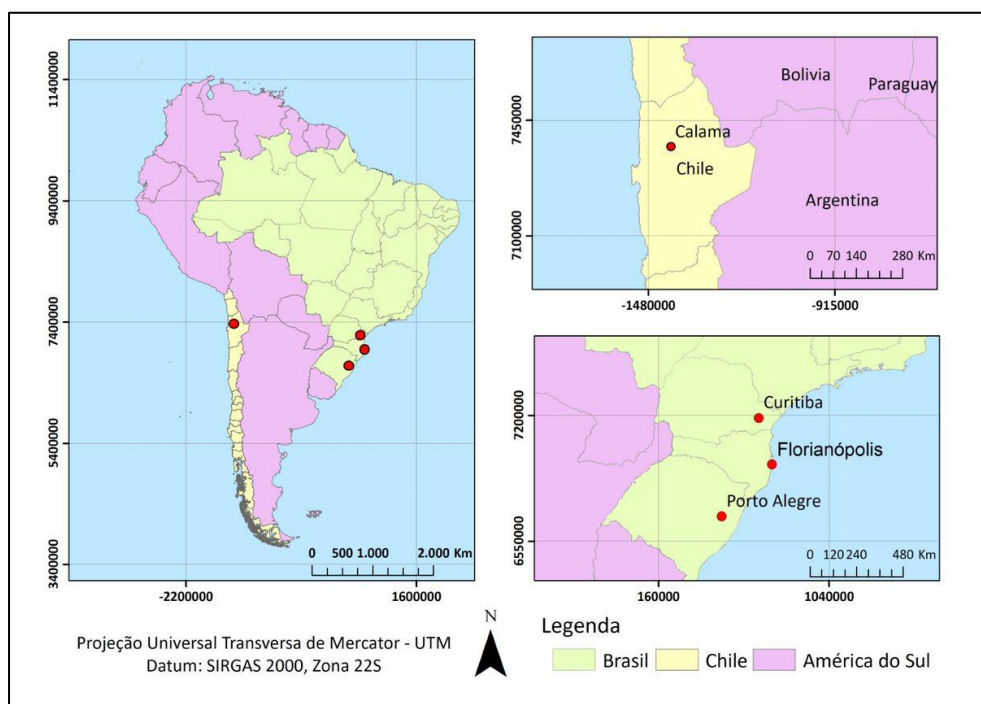
Curitiba é a capital do estado do Paraná, latitude $-25,43^\circ$ e longitude $-49,23^\circ$. De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (Arnfield, 2023), o seu clima é do tipo Cfb, subtropical úmido, apresentando invernos com geadas frequentes e verões frescos e temperatura média anual de 17°C (Bomm et al., 2020). Possui uma área territorial de $434,892\text{ km}^2$ e conforme o último censo, realizado em 2022, a cidade conta com 1.773.718 habitantes, com densidade demográfica de 4.07853 hab/km^2 (IBGE, 2022).

Florianópolis é uma cidade litorânea, com latitude: $-27,6^\circ$ Sul, longitude: $48,50^\circ$. Sua caracterização climática, de acordo Köppen-Geiger (Arnfield, 2023), é Cfa, clima subtropical, sempre úmido, e verão quente. A média mensal da temperatura ar costuma ficar acima de 20°C

(Minuzzi; Tridapalli, 2019; Silveira; Pinto e Westphal, 2019). Possui uma área territorial de 674,844 km², com 537.211 habitantes e densidade demográfica de 796,05 hab/km² (IBGE, 2022).

Porto Alegre é a capital do Rio Grande do Sul, com latitude -30,05 e longitude -51,16. Com base na classificação climática de Köppen-Geiger (Arnfield, 2023), o clima é do tipo Cfa, subtropical, mesotérmico úmido, com estações definidas, verões quentes e invernos moderadamente frios, sua temperatura média anual é de 19.5°C (Ennes et al., 2022; Kaiser et al., 2020). Possui uma área da unidade territorial de 495,390 km², com 1.332.845 habitantes e densidade demográfica de 2.690,50 hab/km² (IBGE, 2022).

Figura 1 - Mapa localização das cidades de estudo.



Fonte: Autores.

2.2 Validação dos Dados da Plataforma Nasa Power

Para realizar os cálculos necessários para a comparação dos resultados, inicialmente buscou-se dados de estações meteorológicas, visando levantar os dados de temperatura do ar e radiação solar global. Porém, devido à dificuldade de se encontrarem estes dados, em uma série

histórica de no mínimo 30 anos para ambos os locais, optou-se por utilizar os dados da plataforma online NASA POWER (NASA, 2018).

A plataforma NASA POWER vem ao longo dos anos ganhando, cada vez mais, espaço no âmbito da pesquisa científica, pois, seus dados são gerados a partir de satélites com cobertura mundial possibilitando a obtenção de uma ampla e completa série histórica de dados de qualquer ponto do globo, além de demonstrar confiabilidade e proximidade dos dados quando comparados às estações meteorológicas de superfície.

Considerando que os dados apresentados são obtidos através de observações de satélites e modelos de assimilação específicos, e não através de medições diretas, foi realizada a validação dos dados de radiação solar global da plataforma NASA POWER para a cidade de Porto Alegre, que é a cidade mais ao Sul quando comparada às demais analisadas. Devido à sua posição latitudinal, esperava-se maior amplitude na variação de dados, tanto de temperatura, quanto de radiação.

A validação foi realizada através da comparação dos valores de radiação solar global em superfície horizontal com os valores de uma estação meteorológica, do Instituto Nacional de Meteorologia, localizada na cidade, que apresenta dados completos de radiação solar global a partir do ano de 2001, sendo assim, o período utilizado, nesta pesquisa, foi de 2001 a 2020, devido à normal climatológica a ser analisada.

Os dados diários da plataforma NASA POWER e da estação meteorológica foram agrupados em médias mensais e, através da análise do gráfico gerado pela comparação dos mesmos, e de testes estatísticos avaliou-se a validação dos dados. Foi calculado, através do software Excel, o coeficiente de correlação (r), que indica a relação entre as variáveis, ou seja, qual o comportamento de um elemento, considerando que o outro está variando. Tal coeficiente varia de -1 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, mais forte é a relação entre as variáveis. Também foi calculado o coeficiente de determinação (r^2), que indica o quão bem um determinado modelo conseguiu representar um dado coletado. O r^2 varia de 0 a 1, e quanto mais próximo de 1, melhor o modelo descreve a realidade.

2.3 Dados de Entrada

As variáveis necessárias para realizar a metodologia de cálculo utilizada são: a radiação solar global em superfície horizontal e a temperatura do ar. Estas variáveis foram obtidas para as quatro cidades analisadas, no período de 01/1991 a 12/2020, ou seja, um período de 30 anos,

o qual é recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para que se tenha uma boa representatividade dos dados climáticos. Os dados diários de cada ano foram agrupados através de média aritmética simples, obtendo-se assim, as médias para 365 dias.

O módulo fotovoltaico utilizado para o estudo, foi o modelo RSM72-6-330P da marca Risen. Vale ressaltar que nos cálculos não foram consideradas as perdas de energia causadas por outros aparelhos que são necessários para o funcionamento do painel fotovoltaico, tais como o inversor, as baterias e os cabos elétricos.

2.4 Cálculos Utilizados

A metodologia de cálculos utilizada foi baseada nas equações apresentadas por Duffie e Beckman (1980), Iqbal (1983) e Skoplaki e Palyvos (2009). Partindo-se dos dados de intensidade de radiação solar num plano horizontal, foi calculada, inicialmente, a intensidade de radiação solar em plano inclinado ótimo, conforme a Equação 2. Tal equação descreve a quantidade de radiação incidente sobre a placa considerando sua melhor angulação de posicionamento, o que corresponde ao ângulo corrigido da latitude do local.

A Equação 1 apresenta a fórmula utilizada para correção da latitude e a Equação 2 corresponde ao cálculo da radiação em uma superfície inclinada ótima.

$$\beta_{otm} = 3,7 + 0,69 \cdot \varphi \quad (1)$$

Onde:

β_{otm} = angulação ótima para a placa solar (°);

φ = latitude do local (°).

$$I(\beta_{otm}) = \frac{I(0)}{1 - 4,46 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{otm} - 1,19 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{otm}^2} \quad (2)$$

Onde:

$I(\beta_{otm})$ = intensidade da radiação solar em plano inclinado ótimo (Wh/m²/dia);

$I(0)$ = intensidade da radiação solar em plano horizontal (Wh/m²/dia);

β_{otm} = angulação ótima para a placa solar (°).

Com a intensidade de radiação solar em plano inclinado ótimo calculou-se, através da Equação 3, o número de horas de sol equivalente, que corresponde à transformação de 1 hora de sol do painel sobre a radiação incidente em uma quantidade de horas de sol sobre uma radiação de 1000 W/m². O uso da comparação com a radiação de 1000 W/m² se deve ao fato de que os painéis solares são projetados para essa condição média de radiação solar.

$$H_s = \frac{I(\beta_{otm})}{1000} \quad (3)$$

Onde:

H_s= número de horas de sol equivalente (hrs);

I(β_{otm}) = intensidade da radiação solar em plano inclinado ótimo (Wh/m²/dia).

Além da inclinação do módulo em si, outro ângulo importante de se avaliar é a declinação solar, que se trata do ângulo formado entre o Equador da Terra e o eixo do Sol, e varia em cerca de - 23,5° à + 23,5°, ou seja, esse ângulo indica a posição do Sol em relação a Terra.

Devido à declinação solar, em determinados períodos do ano, a Terra se encontra mais próxima do Sol, o que é conhecido como solstício de verão, que no hemisfério sul ocorre dia 21 de dezembro e no hemisfério norte dia 21 de junho; ou mais afastada do Sol, o que é chamado de solstício de inverno, e ocorre dia 21 de junho no hemisfério sul e no hemisfério norte dia 21 de dezembro. Assim, no período em que uma determinada localidade se encontra no solstício de verão, recebe mais radiação, devido a maior proximidade com o Sol, o que por consequência leva a uma maior produção de energia. Sendo assim, foi calculada, através da Equação 4, a declinação solar para cada dia Juliano, ou seja, considerando os dias de um ano de forma corrida, sem a contagem mensal.

$$\delta = 23,5 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (d + 284) \right] \quad (4)$$

Onde:

δ = declinação solar ($^{\circ}$);

d = dia juliano (adimensional).

A partir da declinação solar calculou-se a duração de cada dia, através da Equação 5.

$$D = \frac{2}{15} \cdot \arccos(-\operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi) \quad (5)$$

Onde:

D = duração do dia (hrs);

δ = declinação solar ($^{\circ}$);

φ = latitude do local ($^{\circ}$).

Em seguida, calculou-se a irradiância solar, através da Equação 6. A irradiância solar corresponde à média diária de radiação solar incidente no painel solar, que é utilizada para calcular a temperatura média do painel fotovoltaico no dia.

$$G(O) = \frac{I(O)}{D} \quad (6)$$

Onde:

G(O) = radiação solar incidente (W/m^2);

I(O) = intensidade da radiação solar em plano horizontal ($\text{Wh}/\text{m}^2/\text{dia}$);

D = duração do dia (hrs).

Posteriormente, calculou-se a temperatura do módulo fotovoltaico, de acordo com a temperatura do ar e a radiação média incidente no painel, juntamente com o fator de correção da temperatura. O fator de correção da temperatura é utilizado para calcular a quantidade de

energia gerada, para se avaliar a interferência da temperatura sobre a energia gerada. Tais cálculos são realizados através das Equações 7 e 8, respectivamente.

$$T_m = T_a + \frac{G \cdot (NOCT - 20)}{800} \quad (7)$$

Onde:

T_m = temperatura do módulo (°C);

T_a = temperatura ambiente (°C);

G = radiação solar incidente (W/m²);

$NOCT$ = temperatura normal de funcionamento do módulo (45°C - dado pelo fabricante).

$$K_T = 1 - 0,005 \cdot (T_m - 25) \quad (8)$$

Onde:

K_T = fator de correção da temperatura (adimensional);

T_m = temperatura do módulo (°C).

Em seguida foi calculada a energia fotovoltaica produzida pelo módulo fotovoltaico, por meio da Equação 9.

$$E = \frac{P_{FV} \cdot H_S \cdot K_T \cdot \eta_{FV}}{1000} \quad (9)$$

Onde:

E = energia produzida (KWh);

P_{FV} = potência de serviço (330W – potência do módulo escolhido, fornecida pelo fabricante);

H_S = número de horas de sol (hrs);

K_T = fator de correção da temperatura (adimensional);

η_{FV} = rendimento que considera as perdas dos demais equipamentos do sistema (como não foram consideradas as perdas, o valor utilizado foi 1, se trata de um valor adimensional).

A divisão dos termos acima por 1000, na Equação 9, é feita para converter o valor resultante de Wh para KWh.

Para se obter a energia gerada sem a interferência da temperatura do módulo, basta não multiplicar a Equação 9 pelo fator de correção da temperatura (KT).

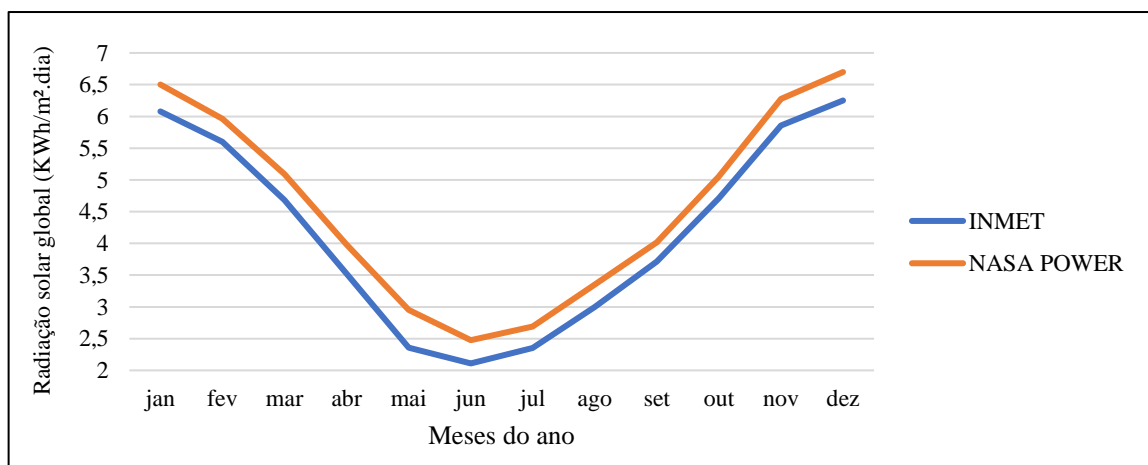
3 Resultados e Discussão

3.1 Validação dos Dados

Através da Figura 2, é possível observar a relação dos dados da plataforma NASA POWER em relação aos dados obtidos na estação meteorológica INMET em Porto Alegre. Nota-se que em nenhum momento ocorreu sobreposição de dados, em que aqueles obtidos por meio da plataforma estão ligeiramente acima dos dados de superfície, porém representam com eficiência o ciclo anual da radiação solar global, representativo aos meses de maior/menor disponibilidade.

Apesar da diferença observada, os coeficientes de correlação (r) e coeficiente de determinação (r^2) demonstraram um excelente resultado, ambos acima de 0,99, indicando uma forte relação e representatividade dos dados.

Figura 2 - Comparativo radiação solar global INMET x NASA POWER.

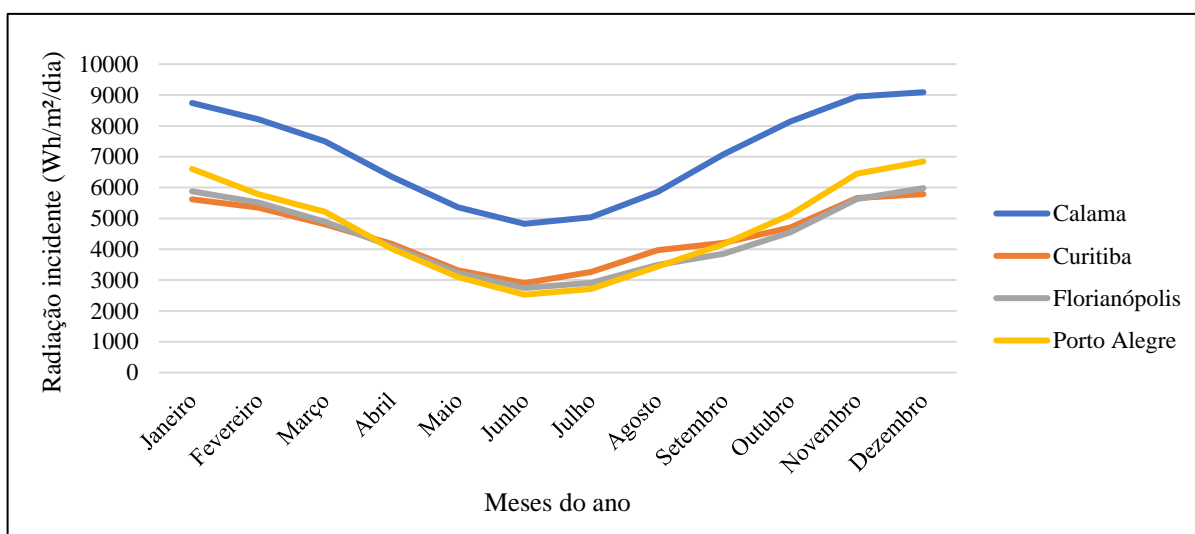


Fonte: Autoras (2023).

3.2 Estimativa da Energia Produzida

Através dos dados obtidos da plataforma NASA POWER e dos cálculos realizados nesta análise, observa-se através da Figura 3, que a radiação solar global em superfície inclinada ótima apresentou valores mais elevados para Calama, seguido de Porto Alegre, Curitiba e Florianópolis.

Figura 3 - Radiação solar global em superfície inclinada ótima nas cidades analisadas.



Fonte: Autoras (2023).

A localização geográfica de Calama permite níveis de radiação mais elevados, tal efeito também foi observado por Kirchhoff et al. (2020) pois quanto mais próximo da linha do Equador (latitude 0), maior a concentração de raios solares.

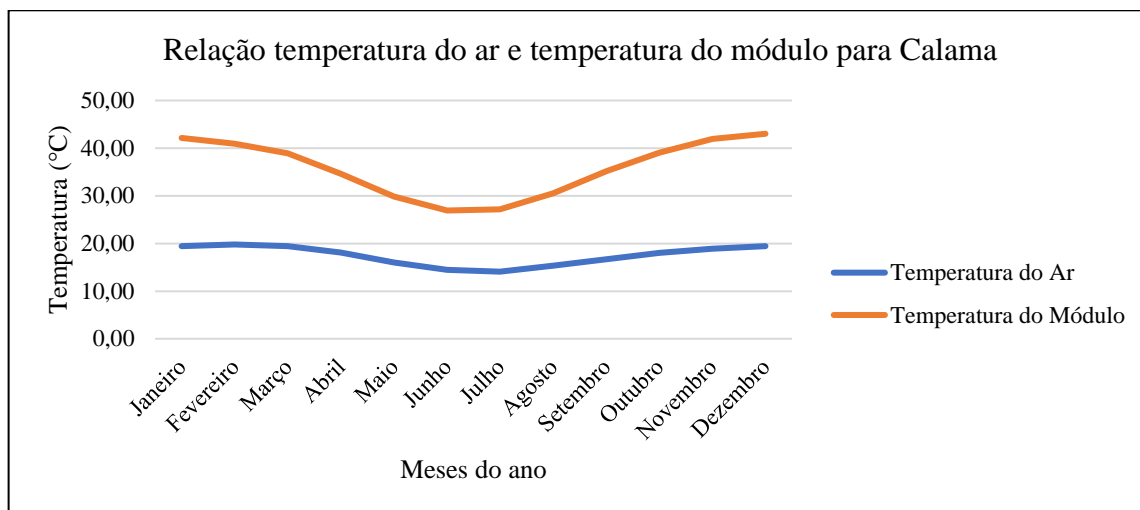
Assim como a radiação solar global, outro fator que exerce influência na produção de energia fotovoltaica é a temperatura do ar, porque pode interferir na temperatura do módulo, onde temperaturas mais elevadas provocam a redução da tensão da placa e, conseqüentemente, a potência gerada diminui (Ruviano et al., 2018).

Através das Figuras 4, 5, 6 e 7, nota-se que as localidades estudadas demonstraram comportamento semelhante ao longo dos meses, por estarem em latitudes médias e que, por isso, as temperaturas desses locais sofrem influência direta das estações do ano devido ao processo de translação da Terra. Durante os meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) são encontradas as maiores temperaturas, assim como nos meses de inverno (junho, julho e agosto),

em que as temperaturas são relativamente menores. Esse comportamento também pode ser observado no gráfico anterior, com relação à radiação solar global.

Calama (Figura 4) e Florianópolis (Figura 6) apresentaram os maiores valores máximos de temperatura do módulo, 43,02°C e 39,03°C, respectivamente, ambos em dezembro. Porém, apesar da elevada temperatura, tal fato não causará impactos na eficiência do módulo fotovoltaico, considerando que o modelo selecionado opera com uma temperatura normal de funcionamento de 45° C.

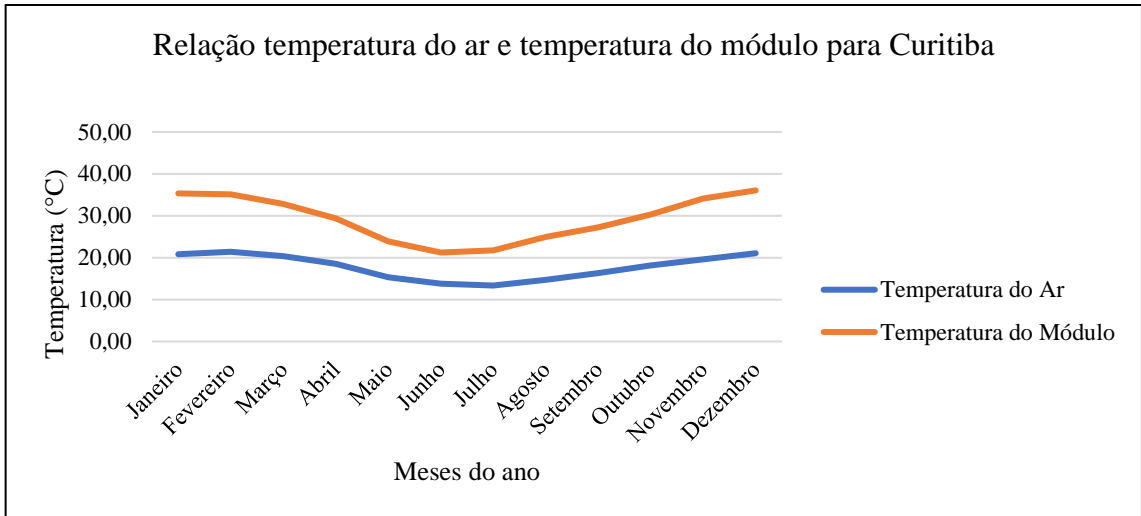
Figura 4 - Relação temperatura do ar e temperatura do módulo para Calama.



Fonte: Autoras (2023).

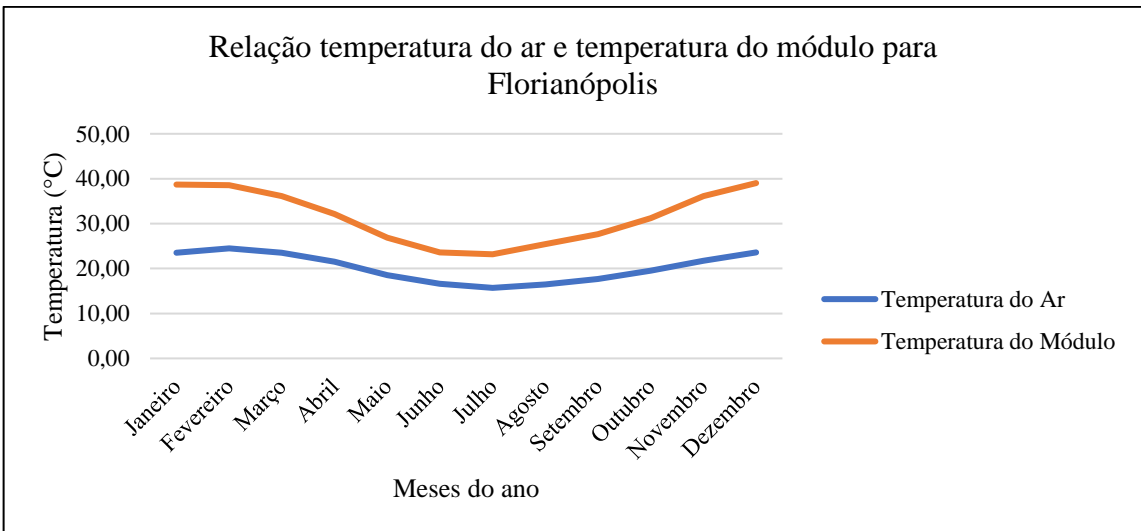
Já com relação aos valores mínimos de temperatura encontrados, Curitiba apresentou 21,22°C e Porto Alegre 23,21°C e (Figuras 5 e 7). Esses locais representam invernos mais rigorosos em comparação às demais, uma vez que Calma está localizada mais próximo à linha do Equador e Florianópolis é uma cidade litorânea, o que provoca uma menor amplitude térmica ao longo do ano.

Figura 5 - Relação temperatura do ar e temperatura do módulo para Curitiba.



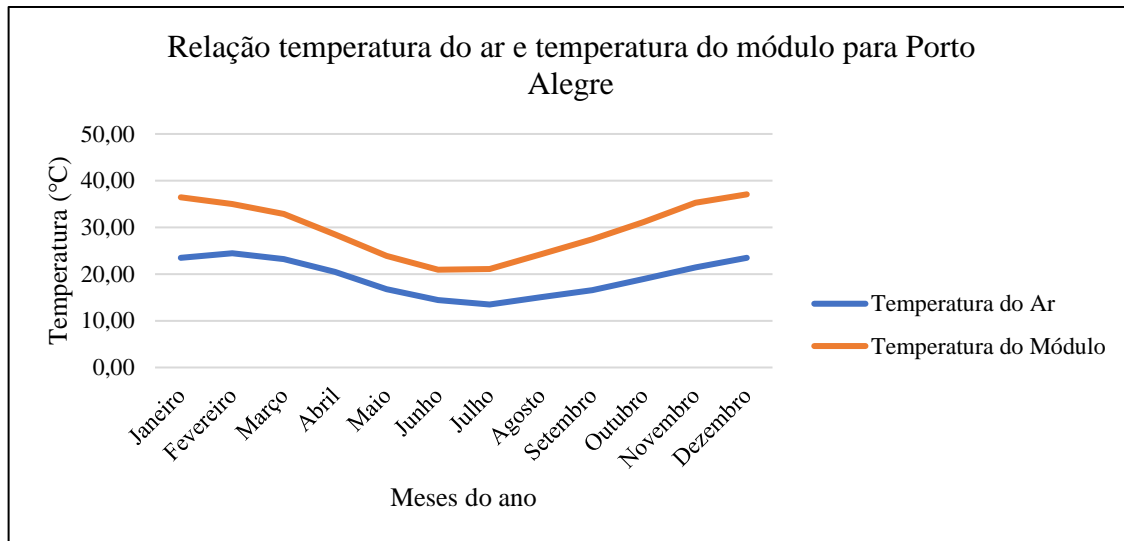
Fonte: Autoras (2023).

Figura 6 - Relação temperatura do ar e temperatura do módulo para Florianópolis.



Fonte: Autoras (2023).

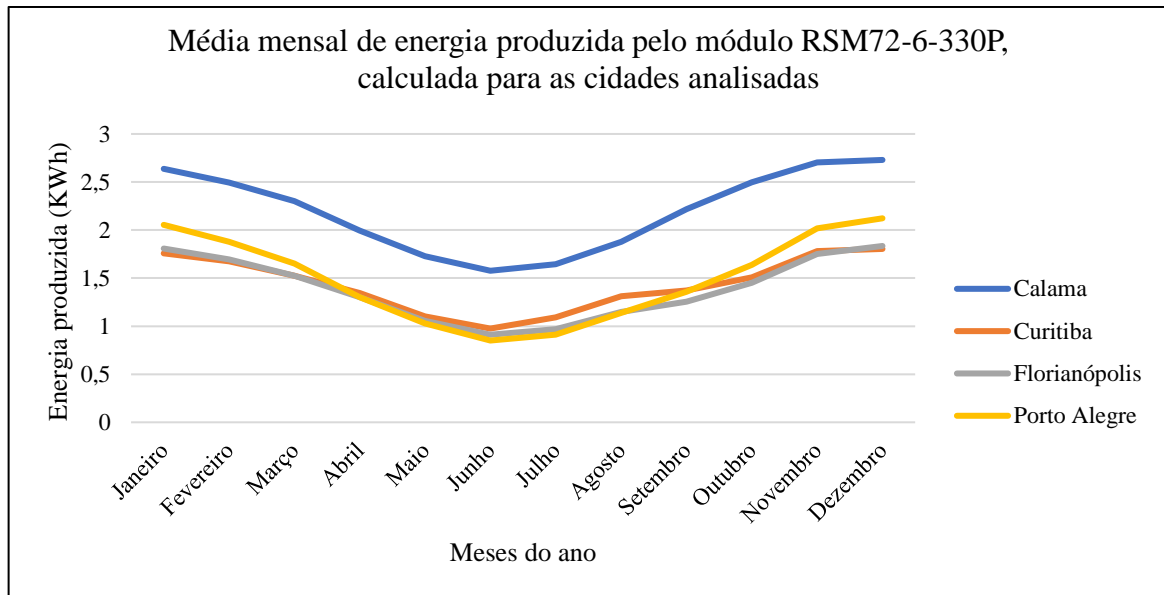
Figura 7 - Relação temperatura do ar e temperatura do módulo para Porto Alegre.



Fonte: Autoras (2023).

A média mensal de energia produzida por um módulo RSM72-6-330P para as cidades estudadas, pode ser observada na Figura 8. Como esperado, Calama foi a localidade que apresentou valores mais elevados em todos os meses, quando comparada às outras cidades, tal fato está diretamente relacionado com sua posição geográfica no globo, que provoca níveis de radiação solar global incidente mais elevados, além de apresentar valores de temperatura do ar mais constantes que influenciam na eficiência do módulo fotovoltaico. A influência da temperatura na produção de energia pode ser percebida em Florianópolis, que apresentou médias e valores máximos de temperatura do ar mais elevados quando comparados com aqueles calculados para as outras capitais, resultando em uma menor produção energética mensal.

Figura 8 – Média mensal da energia produzida nas cidades analisadas em KWh.



Fonte: Autoras (2023).

Apesar de Calama representar a maior produção energética, através do gráfico da Figura 8 é possível notar um comportamento semelhante entre as demais localidades estudadas, onde não há uma constância ao longo dos anos, e sim uma variação sazonal, com reduções significativas nos meses de inverno, devido à maior inclinação do ângulo de incidência de radiação solar nos meses de inverno.

As capitais do sul do país apresentaram valores semelhantes entre si, com maior destaque para Curitiba que, principalmente durante os meses de inverno, apresenta maior produção de energia em comparação às outras, devido a sua posição geográfica ser mais vantajosa para a produção de energia solar durante esse período. Porto Alegre também demonstrou um comportamento interessante entre as capitais brasileiras, por apresentar a maior produção de energia durante os meses mais quentes, porém no inverno essa produção decresce bruscamente devido à sua condição geográfica que impede a chegada de raios solares de forma mais intensa, além de apresentar temperaturas mais baixas em comparação às demais.

Conforme Fedrigo, Ghisi e Lamberts (2009), a região Sul do Brasil apresenta o maior consumo residencial entre as demais regiões, onde, durante os meses de verão, o consumo atinge 273,1 kWh/mês e durante o inverno, 261,3 kWh/mês. De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, seriam necessários aproximadamente 6 módulos fotovoltaicos RSM72-6-330P, por residência para suprir esse consumo, ou com a criação de parques solares para atender à demanda de cada cidade, ou ainda, através do seu uso conjugado com outra forma de

energia, sendo ela limpa ou convencional, como através de usinas hidrelétricas ou termoelétricas.

A partir dos dados diários de radiação e temperatura do ar, analisou-se por meio de regressão linear simples, a influência dessas variáveis na energia produzida por um módulo fotovoltaico. Os resultados encontrados para as cidades analisadas deram-se de forma semelhante, principalmente na relação Radiação x Energia Produzida, onde o coeficiente de determinação ficou acima de 99% para todas as cidades. Este resultado expressa uma relação direta entre as variáveis, ou seja, quanto maior os valores de radiação, maior será a energia produzida pelo módulo. Tal comportamento também foi verificado no estudo de Gnoatto et al. (2008) onde foi encontrado um coeficiente de 99,74% para as mesmas variáveis.

Já com relação à Temperatura do Ar x Energia Produzida, o coeficiente de determinação avaliado apresentou-se de forma reduzida em comparação à relação anterior, o que representa uma relação de dependência mais fraca entre as variáveis, porém ainda sim representativa. Para Porto Alegre, foi encontrado um coeficiente de aproximadamente 80%, enquanto para as demais, o coeficiente foi de aproximadamente 70%.

4 Conclusão

- Através do estudo e da análise de resultados, as capitais do sul do Brasil apresentaram valores similares àqueles calculados para a cidade de Calama, que tem um enorme potencial fotovoltaico já instalado. A cidade de Curitiba apresentou um a maior potencial entre as capitais do sul, devido principalmente a sua posição geográfica, seguida de Porto Alegre e Florianópolis, embora as temperaturas elevadas para essa cidade podem ter provocado uma leve redução na eficiência do módulo fotovoltaico.
- Os resultados indicam que, caso houvesse interesse, por parte dos gestores políticos e conseqüentemente, um maior investimento para essa alternativa energética, as capitais do sul do Brasil representariam um enorme potencial, principalmente no verão, onde a temperatura e a radiação solar são fatores favoráveis para uma elevada produção de energia. Porém, durante os meses de inverno, a produção seria reduzida devido à influência da incidência de radiação solar.
- Sendo assim, esta pesquisa recomenda a utilização de um sistema híbrido em situações como essa, onde é possível utilizar diferentes tipos de fontes de energia de forma conjunta, como energia solar e hidráulica, por exemplo, onde os benefícios de ambas

são aproveitados, assegurando uma otimização de produção durante períodos de menor incidência solar, além do uso sustentável de fontes alternativas que garantem um menor impacto para o meio ambiente.

Referências

- Aguirre, C. G. M. C. (2012). Generación de series artificiales de irradiación solar diaria para Chile a partir de los datos del Archivo Nacional Solarimétrico. Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile).
- Alawad, S. M., Mansour, R. B., Al-Sulaiman, F. A., & Rehman, S. (2023). Renewable energy systems for water desalination applications: A comprehensive review. *Energy Conversion and Management*, 286, 117035.
- Araújo, R. S., de Sousa, F. L. N., Vanderley, P. S., da Silva Bentes, S. O., Gomes, L. M., & Ferreira, F. C. L. (2022). Fontes de energias renováveis: pesquisas, tendências e perspectivas sobre as práticas sustentáveis. *Research, Society and Development*, 11(11), e468111133893-e468111133893.
- Arnfield, A. John (2023, October 16). Köppen climate classification. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/Koppen-climate-classification>
- Azizi, S., Shakibi, H., Shokri, A., Chitsaz, A., & Yari, M. (2023). Multi-aspect analysis and RSM-based optimization of a novel dual-source electricity and cooling cogeneration system. *Applied Energy*, 332, 120487.
- Bomm, B. F. H., Biondi, D., dos REIS, A. R. N., Ho, T. L., Oliveira, J. D., Martini, A., & Behling, A. (2020). Percepção dos moradores sobre os canteiros da arborização viária de Curitiba, Paraná. *Acta Biológica Catarinense*, 7(1), 46-56.
- Correa-Puerta, J., Ferrada, P., Häberle, P., Díaz-Almeida, D., Sanz, A., Zubillaga, O., ... & del Campo, V. (2021). Comparing the effects of ultraviolet radiation on four different encapsulants for photovoltaic applications in the Atacama Desert. *Solar Energy*, 228, 625-635.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (1980). *Solar engineering of thermal processes* (p. 16591). New York: Wiley.
- Ennes, L.S., Haag, R., Ducati, J. R., & Becerra-Rondón, A. C. (2022). Análise Preliminar da Distribuição da Radiação Solar Global Horizontal na Cidade de Porto Alegre-RS. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 13(2), 125-134.

- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2050 (2020). <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>
- Fedrigo, N. S., Ghisi, E., & Lamberts, R. (2009). Usos finais de energia elétrica no setor residencial brasileiro. Encontro nacional de conforto no ambiente construído, 10, 367-376.
- Ferrada, P., Marzo, A., Cabrera, E., Chu, H., del Campo, V., Rabanal, J., ... & Kopecek, R. (2017). Potential for photogenerated current for silicon based photovoltaic modules in the Atacama Desert. *Solar Energy*, 144, 580-593.
- Gnoatto, E., Dallacort, R., Ricieri, R. P., de Lima Silva, S., & Ferruzi, Y. (2008). Eficiência de um conjunto fotovoltaico em condições reais de trabalho na região de Cascavel. *Acta Scientiarum. Technology*, 30(2), 215-219.
- IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). *Panorama de Curitiba*. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/curitiba/panorama>
- IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). *Panorama de Florianópolis*. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/florianopolis/panorama>
- IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). *Panorama de Porto Alegre*, <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/porto-alegre/panorama>
- IEA-International Energy Agency. (2022). *Renováveis 2022*, <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>
- Iqbal, M. (2012). *An introduction to solar radiation*. Elsevier.
- Irena, A. (2020). Renewable capacity highlights. Proc. Int. Renew. Energy Agency (IRENA), 1-8.
- Jeelani, S. H., Puviarasi, R., Chilambarasan, M., Shinde, S. S., Surakasi, R., Sharma, V., ... & Mohanavel, V. (2022). An approach to the utilization of grid integration to analyze the performance and quality of solar photovoltaic model. *Energy Reports*, 8, 1029-1044.
- Kaiser, E. A., Linn, R. D. M., Rolim, S. B. A., Käfer, P. S., Da Rocha, N. S., Diaz, L. R., ... & Hallal, G. P. (2020, March). The Urban Heat Island of Porto Alegre, Rs, Southern Brazil: An Analysis Between 1985 and 2019 Through the Radiative Transfer in the Infrared Thermal. In 2020 IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS) (pp. 619-623). IEEE.
- Kirchhoff, V. W. J. H., Echer, E., Leme, N. P., & Silva, A. A. (2000). A variação sazonal da radiação ultravioleta solar biologicamente ativa. *Revista Brasileira de Geofísica*, 18, 63-74.

Minuzzi, R. B., & Tridapalli, I. R. (2019). Evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Piche em diferentes condições de nebulosidade para Florianópolis, Santa Catarina. *Revista Engenharia na Agricultura*, 27(1), 61-67.

NASA. (2018). ArcGIS Web Application. Nasa.gov. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.

Qian, J., Li, K., Wu, H., Yang, J., & Li, X. (2017). Synergetic control of grid-connected photovoltaic systems. *International Journal of Photoenergy*, 2017.

Ruiz, C. H., & Abarzúa, J. Q. (2012). Variaciones Espacio-Temporales del Clima Urbano En Ciudades Desérticas: El Caso De Calama Y Antofagasta1. *Sociedad Chilena De Ciencias Geograficas*, 16(19), 61.

Ruviaro, R. S., Daltrozo, J. G., Garlet, L., de Lourenço, W. M., & dos Santos, Í. P. (2018, December). Análise da variação da eficiência do módulo fotovoltaico em função da temperatura. In *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*.

Santos, A. J. L., & Lucena, A. F. (2021). Climate change impact on the technical-economic potential for solar photovoltaic energy in the residential sector: a case study for Brazil. *Energy and Climate Change*, 2, 100062.

Silva, H. M. F., & Araújo, F. J. C. (2022). Energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão bibliográfica. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, 8(3), 859-869.

Silva, R. G., & Carmo, M. J. (2017). Energia solar fotovoltaica: uma proposta para melhoria da gestão energética. *InterSciencePlace*, 12(2).

Silveira, V. D. C., Pinto, M. M., & Westphal, F. S. (2019). Influence of environmental factors favorable to the development and proliferation of mold in residential buildings in tropical climates. *Building and Environment*, 166, 106421.

Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar energy*, 83(5), 614-624.

Teixeira, R. L. P., & Pessoa, Z. S. (2022). Interfaces entre adaptação climática e energias renováveis: notas para um debate teórico-analítico. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 11(3), 144-156.

Zaragoza, G., Andrés-Mañas, J. A., & Ruiz-Aguirre, A. (2018). Commercial scale membrane distillation for solar desalination. *NPJ Clean Water*, 1(1), 20.