

Received:
January 09, 2023

Accepted:
April 03, 2023

Published:
April 30, 2023

Sizing of a Photovoltaic Solar Plant on Campus II of UFVJM in Diamantina, Minas Gerais

Jéferson Carvalho Miranda Rodrigues¹ , Marcelino Serreti Leonel¹ , Antônio Genilton Sant'Anna¹ , Ulisses Barros de Abreu Maia¹ 

¹ Federal University of Jequitinhonha and Mucuri Valleys, Diamantina, Brazil.

Email address

jeferson.carvalho@ufvjm.edu.br (Jéferson C. M. Rodrigues) – Corresponding author.
mserreti@ufvjm.edu.br (Marcelino S. Leonel)
agsantanna@ict.ufvjm.edu.br (Antônio G. Sant'Anna)
umaia@ufvjm.edu.br (Ulisses B. A. Maia)

Abstract

The constant growth of technology has increasingly demanded a better energy matrix. As a result, new, more efficient ways of generating energy have been created. Among all, photovoltaic solar energy is increasingly gaining space in the market due to its efficiency and low impact on the environment. In the present work, the design of a photovoltaic solar plant on Campus II will be calculated, through an on-grid system. For this, it was necessary to obtain the electricity bills of Campus II between the period of 2016 and 2022. After collecting and calculating the energy demand of Campus JK, it was possible to obtain the best type of photovoltaic solar module and frequency inverter. Thus, the design of a photovoltaic solar plant that supplies all the energy demand of Campus JK was carried out.

Keywords: Photovoltaic solar energy, Solar module, Frequency inverter, Sizing.

1. Introdução

A energia solar é uma fonte limpa de energia, não deixa e nem produz impurezas ao planeta Terra, além de ser considerada uma fonte de energia inesgotável. A localização do Brasil no planeta é um grande diferencial pois o Brasil, em sua maior parte, está localizado na zona intertropical, o que traz uma grande vantagem em relação ao alto índice de radiação solar (Torres, 2012). Graças a isso, a fonte fotovoltaica deve se tornar a segunda maior fonte de energia do país, estando atrás apenas da hidroelétrica (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), 2022).

“O efeito fotovoltaico, primeiramente descoberto por Edmond Becquerel, em 1839, implica no aparecimento de uma diferença de potencial nos terminais de uma célula eletroquímica causada pela absorção de luz” (Pinho e Galdino, 2014, p. 52). Desde que foi descoberto o efeito fotovoltaico (FV), cientistas e engenheiros têm buscado formas de uso dessa energia. O primeiro aparato fotovoltaico veio de estudos da física em

1876 e a sua produção industrial, graças ao crescimento da área de eletrônica, só foi iniciada em 1956 (Pinho e Galdino, 2014).

Atualmente, com a tecnologia existente, é plenamente possível utilizarmos fontes de energias renováveis, como a energia solar obtida através dos painéis solares. Os painéis solares convertem a luz solar em energia elétrica de forma direta, devido ao efeito FV. O efeito FV consiste na obtenção de corrente elétrica, através de uma diferença de potencial, gerada quando fótons da radiação solar incidem sobre um material semicondutor previamente purificado e dopado (Espostio e Fuchs, 2013).

O aproveitamento de energia solar para geração de energia elétrica se tornou uma alternativa promissora para enfrentar os problemas da demanda de energia elétrica. Isso se dá devido ao desenvolvimento na área FV, graças aos progressos tecnológicos e, também, da redução de custos (Antoniolli, 2015). Segundo Jardim (2007), a fomentação da indústria brasileira de módulos FV ocasiona um aumento da escala de produção de

sistemas FV bem como uma redução dos custos envolvidos. Esta pode ser uma reação da utilização de forma estratégica de sistemas FV interligados à rede elétrica.

Para instalar uma usina de energia FV, é necessário saber o quanto de energia é consumido. Caso não se tenha essa estimativa, há o risco de não se conseguir obter a corrente elétrica necessária para sustentar o imóvel ou instituição desejada, tornando a usina inútil. Portanto, para utilizar a energia solar, é importante realizar o dimensionamento do sistema FV encontrando assim informações cruciais como a irradiância e a irradiação solar, bem como o consumo médio de energia. Com isso, é possível traçar quais são os módulos FV, quantas delas serão utilizadas e qual é o inversor de frequência adequado. Assim, é possível obter as melhores especificações da instalação e uso dos módulos FV.

O dimensionamento de um sistema FV é baseado no consumo médio mensal de energia elétrica (Ribeiro, 2016). Logo, o dimensionamento é utilizado para atender uma estimativa média do consumo de energia (Malamut, 2017). A instalação de uma usina FV no Campus JK pode ajudar a diminuir os gastos na área de energia elétrica, podendo redirecionar o excedente para outras áreas. Neste sentido, este estudo se propõe a responder a seguinte questão: qual deve ser o dimensionamento técnico de uma usina de energia solar para atender a demanda do Campus JK da UFVJM? Para responder essa pergunta os seguintes objetivos foram traçados:

Demonstrar qual deve ser o dimensionamento técnico de uma usina de energia solar para atender a demanda do Campus JK da UFVJM; pesquisar sobre painéis solares; avaliar o histórico de consumo e demanda de energia no Campus JK desde 2016 até 2022; estimar a dimensão da usina de energia solar que seja compatível com a demanda e uso no Campus II (JK) para o mesmo período de sua vida útil; investigar o uso de meios alternativos e sustentáveis de geração de energia para a Universidade. Assim, espera-se poder contribuir para esclarecimentos sobre o tamanho dessa usina de energia solar na UFVJM.

2. Revisão de Literatura

2.1. Energia Solar

Este capítulo discorre sobre o princípio de funcionamento de um módulo fotovoltaico (FV),

qual é a sua estrutura, quais os tipos de módulos que existem e suas vantagens e desvantagens. Outro assunto importante é sobre os fatores de análise para a instalação, o cálculo de potência de um módulo FV, além de um sistema de compensação de energia e um estudo sobre a radiação e irradiação solar. Com essas informações é possível obter então os dados necessários para calcular, qual é o dimensionamento esperado do módulo FV.

2.1.1. Princípio de funcionamento de um sistema solar fotovoltaico

Existem, basicamente, dois tipos sistemas solares FV, ligados à rede (on-grid) e fora da rede (off-grid). No sistema on-grid, o excesso de energia elétrica gerada pelos painéis solares FV é direcionada à rede elétrica. Já no sistema off-grid, o excesso de energia elétrica gerada é armazenado em uma bateria ou em um banco de baterias (Alves, 2019). Neste presente estudo, o foco é no sistema on-grid.

Cada painel fotovoltaico possui suas especificações técnicas, como potência máxima, tensão em circuito aberto, corrente em curto-circuito e máxima tensão do sistema, além de dimensões de cada módulo (Pires, 2015). Como visto anteriormente, é através do painel que a luz solar será convertida em energia elétrica. Por isso, é necessário saber qual o tipo de painel será usado para, assim, evitar falhas no seu funcionamento e, também, para que se obtenha o melhor proveito.

Inversores de frequência convertem corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA) e possuem funções de segurança, seccionamento e monitoramento. Um inversor de frequência está sujeito a uma eficiência, normalmente 98%, por conta de perdas internas dos componentes eletrônicos (Nascimento, 2019). Essa eficiência, juntamente com a quantidade de energia elétrica a ser convertida, torna a escolha do tipo de inversor de frequência indispensável evitando, assim, possíveis falhas e/ou perda de eficiência.

2.1.1.1. Tipos de sistemas fotovoltaicos

Assim como é mostrado na Figura (1), o sistema on-grid, transforma a energia solar em CC que, por sua vez, é convertida em CA através do inversor de frequência que está ligado ao conjunto de módulos fotovoltaicos. Após essa conversão, a energia elétrica é, então, distribuída e o excedente

dessa energia gerada passa pelo medidor de energia, sendo, depois, distribuído à rede elétrica (Sirius, 2021). Essa distribuição é o que gera créditos para serem usados posteriormente.

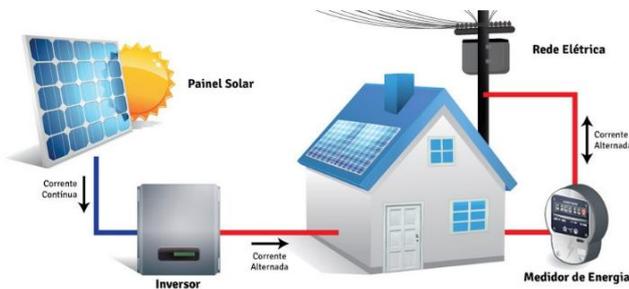


Figura 1 – Funcionamento de um sistema on-grid (Ribsol, 2022).

No sistema off-grid, como é mostrado na Figura (2), funciona de uma forma muito parecida ao sistema on-grid, diferenciando apenas em dois aspectos: que a CC passa por um controlador de carga e no que acontece com o excedente de energia gerada. Nesse sistema, antes da CC chegar ao inversor de frequência, ele passa por um controlador de carga, que protege as baterias de um possível efeito de descarga ou sobrecarga abrupta. Já no caso do excedente, ao invés de ser direcionado à rede, é armazenado em baterias, que, por sua vez, alimentará o sistema quando a produção estiver baixa (Oliveira, 2019). Esse tipo de sistema é comumente usado em casos em que não há atendimento elétrico, ou em casos que há uma queda de energia constante.



Figura 2 – Funcionamento de um sistema off-grid (Neosolar, 2022).

2.1.1.2 Módulos solares

Um módulo solar tem como principal composto o silício (Si). O Si possui uma camada de carga positiva e uma de carga negativa devido a um tratamento químico e, quando há uma incidência

solar no Si, um elétron é desacoplado (Pires, 2015). Quando o elétron é desacoplado se é criada uma diferença de potencial, gerando assim uma corrente elétrica. Dessa forma, é intuitivo e trivial dizer que, quanto mais elétrons houver na célula, mais eletricidade será gerada.

Existem, no geral, 3 (três) tipos de módulos solares: os silícios monocristalinos (mono-Si), os silícios policristalinos (p-Si) e os de filmes fino. Os mono-Si, Figura (3), são utilizados em locais que requerem melhor desempenho por possuir uma alta eficiência. Os p-Si, Figura (4) são muito rentáveis e, por fim, os de filmes finos, Figura (5) são mais leves, portáteis e flexíveis (Engineering Learn, 2022). Cada tipo de módulo solar tem suas especificações e recomendações de uso próprio.

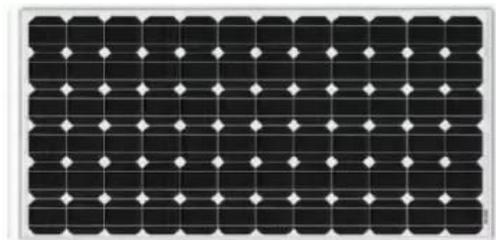


Figura 3 – Módulo solar monocristalino (Energia Solar, 2018).

Os mono-Si são uns dos mais usados e comercializados, tendo um processo básico de fabricação em fornos especiais, a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino (Silva, 2017 e Antonioli et al., 2019). Tendo uma eficiência próxima dos 20% e de fácil reconhecimento visual (Pires, 2015), os mono-Si são usados em locais com problemas como baixa incidência solar. Uma desvantagem do mono-Si é que, devido a sua alta eficiência, o seu custo também é elevado.



Figura 4 – Módulo solar policristalino (Energia Solar, 2018).

Por sua vez, os p-Si têm um custo menor, mas uma eficiência também menor se comparado aos mono-Si. A sua fabricação é feita da fundição de cristais de silício. Quando esses cristais solidificam, no contorno das concentrações dos defeitos, resultam em um bloco com grandes quantidades de cristais (Jardim, 2007). Essa solidificação

direcionada resulta num desempenho inferior em termos de conversão fotovoltaica.



Figura 5 – Módulo solar de filmes finos (Energia Solar, 2018).

Já os de filmes finos possuem a menor eficiência dentre os 3 tipos citados. Uma vantagem muito importante no mercado é a sua estrutura poder se adaptar muito bem às arquiteturas dos edifícios, por serem bastante flexíveis e também semitransparentes. A sua fabricação é feita através de depósitos de camadas extremamente finas de material semicondutor revestidas por proteção mecânica. Dentre esses materiais semicondutores, existem o silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio e disseleneto de cobre índio gálio (Silva, 2017).

2.1.1.3 Inversores de frequência

Um dos fatores que influenciam no rendimento de uma usina solar é o inversor de frequência. Os inversores de frequência transformam a CA em CC 60Hz e produzem uma onda senoidal pura ou modificada (Pires, 2015). Isso ocorre, pois, a maioria dos equipamentos eletrônicos e a rede elétrica funcionam com CC. Existem, basicamente, dois grupos de inversores de frequência: os de rede e os autônomos. Os Grid-Tie e os Grid-Connected compõem os de rede. Por sua vez, os Stand-Alone compõem os autônomos. Em todas as situações, é usado inversores de frequência monofásicos em casos que a potência requerida seja inferior a 5 kW. Em casos que a potência requerida seja maior do que os 5 kW, é indicado inversores trifásicos.

Os inversores de frequência Stand-Alone são utilizados em sistemas off-grid, que são compostos por banco de baterias. Esses inversores servem não somente como conversores CC/CA, mas, também, para proteger as baterias de descargas profundas (Silva, 2017). Como dito anteriormente, o presente estudo se baseia em um sistema on-grid, logo não daremos enfoque a este tipo de inversor de frequência.

Por sua vez, os inversores de frequência Grid-Tie têm como principais funções realizar a

conversão CC/CA, rastrear o ponto de potência máxima (MPPT), desconexão automática e manual da rede, proteção contra anti-ilhamento, sobrecarga e sobretensão, entre outros (Figueira, 2014). O inversor de frequência concede a energia produzida para ser utilizada pela carga, diretamente ao quadro de distribuição de força. Caso a energia gerada na presença de luz solar não seja suficiente para alimentar a carga, é retirada então energia da rede. Caso contrário, ou seja, no caso de haver o excesso de energia gerada, a energia é injetada à rede. Já a noite, obviamente irá ser retirado energia da rede, pois o não possui incidência solar para gerar energia FV (Plenitude Solar, 2022). Esse processo é completamente automatizado pelo inversor de frequência, sem a necessidade de interferência do usuário.

Por fim, os inversores de frequência Grid-Connected possuem basicamente as mesmas funções dos Grid-Tie, com a diferença que os Grid-Connected, estão conectados diretamente à rede. Dessa forma, os Grid-Connected têm a opção de fazer com que toda a energia gerada seja distribuída diretamente à rede, com a única finalidade de gerar créditos para serem usados posteriormente. Esse tipo de inversor de frequência tem um custo geralmente mais alto que o Stand-Alone, pois precisa ter um alto sincronismo com a tensão da rede, priorizando então a qualidade (Silva, 2017).

2.1.2. Fatores de análise para a instalação de um módulo fotovoltaico

Como mencionado na seção 2.1.1.2, existem módulos solares que são utilizados em locais que requerem uma melhor eficiência, enquanto outros são usados em locais que não necessitam de tanta eficiência. Existem alguns fatores que influenciam no momento de escolha de qual módulo FV instalar. A incidência solar, a temperatura, o terreno, a umidade, o sombreamento, etc. são alguns desses fatores que devem ser analisados antes de instalar um sistema solar FV. Tais fatores influenciam diretamente na eficiência de um módulo FV, pois podem gerar perdas na conversão de energia elétrica.

A incidência solar é um dos fatores de análise mais importantes quanto à eficiência de um módulo FV. Os módulos FV devem estar bem posicionados para que recebam o máximo de incidência solar possível, caso isso não aconteça o sistema FV sofrerá com perdas de conversão de energia. A

posição mais favorável para os módulos solares no Brasil é ao norte (HCC, 2022).

Um contra da incidência solar é o aumento da temperatura dos módulos FV, que provoca dois efeitos na célula FV. O primeiro é que, à medida que a temperatura aumenta, há uma diminuição diretamente proporcional da tensão. Já o segundo é que, para valores baixos de tensão, ocorre um pequeno incremento de corrente elétrica (Beltrão, 2008). Tais efeitos ocorrem pois, com o aumento da temperatura há um aumento do tamanho dos átomos de silício da célula. Isso diminui a diferença de potencial gerada na conversão direta de energia solar em energia elétrica, diminuindo também a eficiência do sistema FV.

É muito importante fazer um reconhecimento e estudo do terreno onde se irá instalar o sistema FV. Em alguns casos, se é instalado o sistema no solo que, por haver irregularidades, pode acabar dificultando ou até mesmo alterando o ângulo e orientação do módulo solar. Na outra maioria dos casos, o sistema é instalado nos telhados da residência, comércio ou empresa, sendo bastante viável pois diminui o sombreamento nos módulos FV. Nesses casos de o sistema ser instalado no telhado, é necessário realizar uma análise da estrutura do telhado identificando quais os pontos fortes e fracos do mesmo. Caso não seja feita a análise, o sistema instalado poderá comprometer toda a estrutura, aumentando ou causando a queda do telhado.

Um outro fator importante é analisar o quão úmido é o local que se instalará o sistema FV. A umidade entra pelas bordas da moldura de alumínio causando uma corrosão que ataca as conexões metálicas das células, degradando as junções entre elas e a moldura metálica. Esse ataque aumenta a corrente de fuga, causando uma perda na eficiência do módulo FV (Ndiaye et al., 2013).

Recomenda-se evitar ao máximo possível o sombreamento durante as instalações de sistemas FV. O sombreamento é um efeito causado pelas sombras de outras estruturas ou objetos no módulo FV. Apesar de que pareça ser insignificante a sombra de um poste num módulo solar, essa sombra impede que chegue luz solar de forma direta naquele local. Tal efeito acaba por diminuir a eficiência de um módulo FV, gerando assim perdas de conversão de energia. Por isso, normalmente é indicado que um sistema FV seja instalado nos telhados das casas, pois, geralmente, quanto mais alto o sistema FV estiver, menos sombreamento sofrerá. Todos

esses fatores e citados aqui, bem como outros demais, devem ser cuidadosamente reconhecidos, analisados e estudados a fim de obter um melhor desempenho possível de um sistema FV.

3. Metodologia

3.1. Cálculos necessários

Para instalar uma usina FV é necessário saber qual é a área disponível e o dimensionamento dos módulos FV e do inversor de frequência. Para o dimensionamento dos módulos FV, é necessário obter o consumo médio mensal de energia do Campus II da UFVJM em Diamantina, MG. Através de dados coletados na própria instituição, o valor médio mensal calculado desde o ano de 2016 até 2022 é de aproximadamente 171,05 MWh. Durante os cálculos, outros valores importantes são descobertos tais como a irradiação média solar e o consumo energético diário da instituição. Essas informações são cruciais pois, sem elas, o sistema pode não funcionar corretamente ou até mesmo ser danificado de forma muito rápida.

3.1.1. Hora solar plena

Para encontrar qual é a hora solar plena (HSP), primeiro é necessário saber qual é o consumo médio diário da instituição. No cálculo do consumo médio diário é utilizada a Equação (1).

$$E_D = \frac{E_M}{30} \quad (1)$$

Onde E_D é o consumo médio diário da instituição, E_M é o consumo médio mensal e 30 representa os 30 dias do mês. Depois de encontrar o consumo médio diário, é necessário encontrar também a irradiação solar média. Isso pode ser feito acessando o site do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB) em posse dos valores de latitude e longitude do local onde será instalada a usina FV. No tópico 6, a Figura (6) mostra a irradiação solar na cidade de Diamantina-MG, local onde o Campus JK fica situado. Obtido o valor da irradiação solar média (Figura (6)), é hora de encontrar o valor da hora solar plena (HSP). Esse valor corresponde ao tempo em horas em que a irradiação solar permanece igual a 1 kW/m² e constante. Deve-se também ser proporcional à energia solar disponibilizada no local da instalação da usina em

um dia (Pinho e Galdino, 2014) e é mostrado através da Equação (2).

$$HSP = \frac{\text{Irradiância} \left(\frac{kWh}{m^2 \times dia} \right)}{1 \left(\frac{kW}{m^2} \right)} \quad (2)$$

Uma vez encontrado os valores do consumo médio diário (Equação (1)) e da hora solar plena (Equação (2)) é possível então calcular qual é a potência de pico do painel FV.

3.1.2. Potência de pico do painel fotovoltaico

O cálculo da potência de pico do painel FV se dá através da Equação (3).

$$P_{FV} = \frac{Ed/TD}{HSP} \quad (3)$$

Onde P_{FV} é a potência de pico do painel FV, dado em Wp e TD é a taxa de desempenho do módulo FV. A taxa de desempenho deve estimar todas as perdas envolvidas e a potência real do sistema enquanto operando (Pinho e Galdino, 2014), pois, é através dela que um sistema FV é medido. Abaixo, a Tabela (1) relaciona os fatores de perdas e a variação típica para cada perda. De acordo com a Tabela (1) e com o que já fora dito, a taxa de eficiência de um módulo solar depende de vários fatores, variando entre 75% e 80%, porém, se bem projetado e instalado, pode chegar em até 90% (Reich et al., 2012). Para esse caso será considerado uma taxa de eficiência igual a 80%.

Tabela 1 – Perdas relacionadas a um Sistema FV

Fatores de Perda	Valores Usuais
Sombreamento	1 – 5%
Sujidade	1 – 5%
Mismatch	1 – 5%
Temperatura	0,5 – 2%
Inversor de frequência	2 – 5%
Cabeamento CA	1 – 7%
Cabeamento CC	1 – 7%

Para os próximos passos, é necessário escolher qual o tipo de módulo FV deverá ser utilizado. A escolha de um tipo de módulo FV depende de alguns fatores como econômicos, área e incidência solar. A primeira se baseia no aspecto financeiro tal como a viabilidade econômica do projeto. A segunda se baseia no espaço disponível

para a instalação da usina pois, caso haja pouco espaço, o uso de painéis FV mais eficazes diminui a área requisitada. Por fim, a última se baseia na taxa de incidência solar, pois existem painéis que são projetados para locais com alta incidência solar e outros para locais com baixa incidência solar. Portanto, escolher um tipo de módulo FV deve satisfazer todos os fatores.

Visando atender todas as exigências citadas acima, tem-se como escolha o módulo solar Canadian Solar CS3W-420P. Este é um módulo policristalino, com vida útil de aproximadamente 20 anos, e com uma potência máxima igual a 420 Wp. A seleção desse módulo tem base em sua potência máxima, pois quanto maior a potência menor será o número de módulos a serem usados. Abaixo, a Tabela (2) mostra as especificações deste módulo solar.

Tabela 2 – Especificações do módulo solar Canadian Solar (Canadian Solar, 2022)

Informações	Valores
Potência Máxima (Pmax)	420 Wp
Tensão de Máxima Potência (Vmp)	39,50 V
Corrente de Pico (Imp)	10,64 A
Tensão em Curto Circuito Aberto (Voc)	48,00 V
Corrente de Curto Circuito Aberto (Isc)	11,26 A
Eficiência do Módulo	19,01 %
Temperatura de Operação	-40°C ~ +85°C
Tensão Máxima do Sistema	1500 V
Tolerância de Potência	0 ~ +5 W
Coefficiente de Temperatura (Pmax)	-0,37 % / °C
Coefficiente de Temperatura (Voc)	-0,29 % / °C
Coefficiente de Temperatura (Isc)	0,05 % / °C
Temperatura Nominal de Operação do Módulo	42 ± 3 °C
Número de Células	144 meia-célula 6"
Dimensões	2108 mm x 1048 mm x 40 mm
Peso	24,90 Kg

3.1.3. Número de módulos fotovoltaicos a serem instalados

Após a escolha bem planejada do tipo de módulo FV a ser utilizado, é necessário encontrar

quantos desses módulos são necessários para atender a demanda energética do local. Esse cálculo se baseia na relação entre a P_{FV} (em Wp) sobre a potência do módulo solar escolhido, onde este é dado no momento da compra do painel. Abaixo, a Equação (4) mostra o cálculo a ser feito.

$$N_{PFV} = \frac{P_{FV} (kWp)}{P_{MFV}} \quad (4)$$

Onde N_{PFV} é o número de painéis FV a serem instalados. P_{FV} é a potência de pico do painel FV, encontrado através da Equação (3). E, por fim, P_{MFV} é a potência do módulo FV dada no momento da compra.

3.1.4. Área de instalação

A área de instalação de uma usina é um fator importante a ser calculado, pois não adianta ter um bom projeto e deixa-lo parado por falta de espaço. Esse cálculo é bastante simples e intuitivo, basta saber o número e o tamanho de módulos FV a serem utilizados. Assim, aplica-se a Equação (5).

$$\text{Área} = N_{PFV} \times A_{FV} \quad (5)$$

Onde N_{PFV} já foi obtido através da Equação (4) e A_{FV} é o tamanho do módulo FV escolhido e é dado em m^2 .

3.1.5. Fator de dimensionamento do inversor de frequência

Para calcular o fator de dimensionamento do inversor de frequência (FDI) é necessário ter a potência do inversor de frequência. A potência do inversor de frequência está associada à potência de entrada e saída, do painel FV utilizado (Pinho e Galdino, 2014). A potência de entrada é a soma das potências individuais dos módulos FV, estando relacionada ao arranjo FV. Enquanto a potência de saída está relacionada à potência pico ideal para o sistema FV. Para o cálculo, aplica-se a Equação (6).

$$FDI = \frac{P_{inv} (kWp)}{P_{FV}} \quad (6)$$

Onde P_{inv} é a potência do inversor de frequência escolhido e P_{FV} é obtido através da Equação (3). É bom lembrar que o FDI não pode ter um baixo valor pois, assim pode aumentar o custo

da energia produzida. Entretanto, ter um valor muito alto pode diminuir a vida útil do equipamento, devido à altas temperaturas (Zilles et al., 2012). Portanto, é aconselhável o FDI ter próximo de 90%. Se o valor do FDI obtido estiver fora dos valores indicados, deve-se então escolher outro inversor de frequência, obtendo assim uma melhor eficiência.

3.1.5. Dimensionamento do arranjo fotovoltaico

Para o dimensionamento do arranjo fotovoltaico, necessita-se encontrar qual a quantidade máxima de fileiras em paralelo um arranjo pode ter. Além disso, também é necessário encontrar quantos módulos fotovoltaicos cada fileira consegue suportar. Com isso, é possível encontrar qual será o arranjo das placas fotovoltaicas.

Para encontrar a quantidade máxima de fileiras em paralelo que podem ser instaladas, é necessário saber qual é corrente máxima de entrada do inversor de frequência. Por sua vez, essa corrente máxima de entrada é a soma das correntes de cada fileira. Nesse caso, utiliza-se a Equação (7).

$$N_{FILEIRAS} = \frac{I_{inv,max}}{I_{SC}} \quad (7)$$

Onde $N_{FILEIRAS}$ é a quantidade máxima de fileiras em paralelo, $I_{inv,max}$ é a corrente máxima de entrada do inversor de frequência e I_{SC} é a corrente máxima de curto-circuito do módulo FV.

Após os cálculos do número de fileiras que o inversor de frequência suportará, precisa-se encontrar qual o número máximo de módulos solares cada fileira pode conter. Esse valor é definido através da tensão de entrada CC máxima e mínima que o inversor de frequência permite, pois são esses os valores limites. Assim sendo, é necessário calcular qual é a menor e a maior tensão que um módulo solar pode atingir, determinando assim quantos podem ser instalados em série. É importante lembrar que, para esses cálculos, deve-se considerar uma temperatura extrema mínima de $3^{\circ}C$ e uma máxima de $75^{\circ}C$. Essas são as temperaturas máxima e mínima que os módulos solares podem atingir enquanto funcionam.

No cálculo da tensão máxima e mínima permitida do módulo, serão consideradas as temperaturas extremas de $3^{\circ}C$ e $75^{\circ}C$ como mínima e máxima, respectivamente. Para o cálculo de tensão máxima e mínima que o módulo pode atingir, usa-se a Equação (8) e (9) respectivamente.

$$V_{oc_{min}} = \left(1 - \frac{(25^{\circ}\text{C} - (3^{\circ}\text{C})) \times \Delta V (\%/^{\circ}\text{C})}{100}\right) \times V_{oc} \quad (8)$$

$$V_{oc_{max}} = \left(1 - \frac{(25^{\circ}\text{C} - (75^{\circ}\text{C})) \times \Delta V (\%/^{\circ}\text{C})}{100}\right) \times V_{mp} \quad (9)$$

Onde, V_{oc5} e V_{oc75} correspondem à tensão de circuito aberto nas temperaturas extremas mínima e máxima, respectivamente. 25°C corresponde à temperatura ambiente. ΔV corresponde ao coeficiente de temperatura em Voc dado pelo fabricante. Voc corresponde à tensão de circuito aberto dado pelo fabricante e V_{mp} é a tensão de potência máxima também dado pelo fabricante.

Com os valores de tensão mínima e máxima dispostos, finalmente é possível calcular qual o valor mínimo e máximo de placas em série. Para isso, utiliza-se a Equação (10) e (11), respectivamente.

$$N_{série,min} = \frac{V_{inv,min}}{V_{oc75}} \quad (10)$$

$$N_{série,max} = \frac{V_{inv,max}}{V_{oc3}} \quad (11)$$

Em que $N_{série,min}$ e $N_{série,max}$ correspondem, respectivamente, ao número de módulos mínimo e máximo permitidos por fileira. $V_{inv,min}$ e $V_{inv,max}$ correspondem, respectivamente, ao valor de tensão de entrada mínimo e máximo do inversor de frequência.

4. Resultados e discussão

Dentre todos os três tipos de módulos solares percorridos acima, foi escolhido um módulo solar policristalino. Tal escolha se dá pelo fato de a cidade ter um bom valor de HSP e o Campus JK estar situado em um local de alta altitude. Esses fatores ajudam a diminuir os fatores de perda, o que minimiza a necessidade de um módulo solar mais eficiente e, conseqüentemente, diminui os custos envolvidos.

Substituindo os valores em cada uma das equações é possível encontrar o dimensionamento da usina FV. Na Equação (1) temos que o consumo médio diário é igual a:

$$E_D = \frac{171,05 \text{ MWh}}{30} = 5701,67 \text{ kWh} \quad (1)$$

Na Equação (2) temos que a hora solar plena é igual a:

$$HSP = \frac{5,27 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \times \text{dia}}\right)}{1 \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}\right)} = 5,27 \text{ h/dia} \quad (2)$$

Na Equação (3) temos que a potência do painel solar é de:

$$P_{FV} = \frac{5701,67/0,8}{5,27} = 1352,39 \text{ kWp} \quad (3)$$

Por sua vez, na Equação (4) temos que o número de módulos fotovoltaicos é de:

$$N_{PFV} = \frac{1352,39 \text{ kWp}}{0,42 \text{ kWp}} = 3219,97 \text{ módulos} \quad (4)$$

Como o número de módulos encontrados foi um valor quebrado, opta por arredondar o valor para cima visando perdas por arredondamento dos cálculos anteriores. Logo, o número de módulos a serem instalados para suprir toda a energia necessária é de 3220 módulos.

A área para instalar a usina solar fotovoltaica, dada pela Equação (5), é:

$$\text{Área} = 3220 \times 2,21 = 7116,20 \text{ m}^2 \quad (5)$$

A Equação (6) é usada para obter o fator de dimensionamento do inversor de frequência, e está tem um valor de:

$$FDI = \frac{1275 \text{ kWp}}{1352,39 \text{ kWp}} = 0,94 \quad (6)$$

Como o valor do FDI ficou dentro dos critérios desejados, o inversor de frequência Growatt Max 75ktl3-lv provou-se bastante útil, sendo assim escolhido.

Na seleção do inversor de frequência para essa usina, optou-se por escolher 17 inversores de frequência de 75 kWp afim de suprir toda a potência da usina. Um valor menor de inversores de frequência resultaria numa eficiência abaixo de 90% e um valor acima já ultrapassaria o desejado. Dessa forma, 17 inversores de frequência é um número ideal para uma usina tão grande. A Tabela (3) mostra os dados do inversor de frequência escolhido Growatt Max.

Tabela 3 – Especificações do Inversor de Frequência Solar Growatt Max (Nova TV Show, 2022).

Informações	Valores
Tensão Máxima de Entrada	1100 VCC
Área de Tensão MPP	195 ~ 1000 VCC
Tensão Nominal de Entrada	600 VCC
Corrente DC Máxima por MPTT	25 A
Número de Arranjos por MPTT	2
Rastreadores de MPTT	7
Potência Nominal de Saída	75 kW
Tensão Nominal Trifásico	380 V
Frequência Nominal	60 Hz
Faixa de Frequência	54 ~ 65 Hz
Corrente Máxima de Saída	120,80 A
Eficiência Máxima	98,8%
Distorção Harmônica Total	< 3%

A Equação (7) nos informa o número de fileiras em paralelo que cada inversor de frequência suportará.

$$N_{FILEIRAS} = \frac{25}{11,26} = 2,26 \text{ módulos} \quad (7)$$

Logo, de acordo com os cálculos, o máximo de fileiras em paralelo que cada inversor de frequência suportará é de 2.

A Equação (8) e (9) calcula os valores de tensão mínimo e máximo, respectivamente, que o módulo solar pode atingir. Substituindo os valores nas equações temos:

$$V_{OC_3} = \left(1 - \frac{(25^{\circ}\text{C} - (3^{\circ}\text{C})) \times (-0,29\%/^{\circ}\text{C})}{100}\right) \times 48,00 \quad (8)$$

$$V_{OC_3} = 51,06 \text{ V} \quad (8)$$

$$V_{OC_{75}} = \left(1 - \frac{(25^{\circ}\text{C} - (75^{\circ}\text{C})) \times (-0,29\%/^{\circ}\text{C})}{100}\right) \times 39,5 \quad (9)$$

$$V_{OC_{75}} = 33,77 \text{ V} \quad (9)$$

Por fim, a Equação (10) e (11), que informam o número mínimo e máximo de módulos solares em série permitidos por fileira, se resulta em:

$$N_{série,min} = \frac{200}{33,77} = 5,92 \approx 6 \text{ módulos} \quad (10)$$

$$N_{série,max} = \frac{1100}{51,06} = 21,54 \approx 21 \text{ módulos} \quad (11)$$

Logo, cada fileira pode ter no mínimo 6 e no máximo 21 módulos conectados. É importante lembrar que, caso esses valores não sejam respeitados o inversor de frequência pode ser danificado. Além disso, esses cálculos são feitos baseados no inversor de frequência e no módulo FV

escolhidos durante o presente trabalho. Porém, todos os cálculos podem ser refeitos no futuro, mudando apenas os valores do inversor de frequência e do módulo FV.

Uma vez encontrado o número de fileiras e o número de módulos FV por cada fileira, é necessário agora dispor o arranjo. No caso de suprir 100% da demanda energética da Universidade, ao invés dos 3220 módulos necessários, optou-se por escolher 3234 módulos. Deste modo, o arranjo ficaria dividido de forma igual, com 2 fileiras em paralelo e 21 módulos por fileira, totalizando 42 módulos por inversor de frequência. Escolhendo assim, deve-se obter 77 inversores de frequência.

O presente trabalho conseguiu dimensionar o tamanho de uma usina solar fotovoltaica para o Campus II da UFVJM em Diamantina, Minas Gerais. Como visto acima, suprir toda a demanda energética do Campus JK requer uma área e um número muito grande de módulos solares e de inversores de frequência. Visto que o Campus JK é extenso e que tem bastante terreno livre, ou seja, sem nenhuma construção, pode valer a pena reservar tal área para a construção de uma usina solar fotovoltaica. Entretanto, caso não haja espaço suficiente para a instalação dessa usina, pode ser criada uma usina menor, que visa suprir apenas uma parte da demanda energética do Campus JK.

5. Considerações Finais

Devido à crescente expansão da tecnologia, encontrar meios mais eficientes de geração de energia é a melhor alternativa para evitar a limitação desta expansão. A energia solar fotovoltaica se prova como uma excelente forma de geração de energia. Esse fato se dá, pois, a mesma não causa danos ao meio ambiente e tem uma alta eficiência energética.

O presente trabalho estudou apenas o dimensionamento de uma usina solar, não focando na viabilidade econômica de tal investimento. Para a viabilidade econômica é exigido outro trabalho, o que possibilita um foco maior em cada tema. Isso, então, deixa um espaço para um futuro trabalho de pesquisa sobre a viabilidade econômica da instalação de uma usina solar fotovoltaica no Campus JK.

6. Gráfico da irradiação solar

Este tópico dispõe a Figura (6), citada anteriormente.

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Diamantina
 Município: Diamantina, MG - BRASIL
 Latitude: 18,201° S
 Longitude: 43,549° O
 Distância do ponto de ref. (18,201038° S; 43,575459° O): 2,8 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	5,80	6,09	5,06	4,63	4,19	4,11	4,35	5,17	5,54	5,52	4,95	5,59	5,08	1,99
✓	Ângulo igual a latitude	18° N	5,32	5,83	5,14	5,05	4,90	5,00	5,23	5,87	5,81	5,39	4,62	5,08	5,27	1,26
✓	Maior média anual	18° N	5,32	5,83	5,14	5,05	4,90	5,00	5,23	5,87	5,81	5,39	4,62	5,08	5,27	1,26
✓	Maior mínimo mensal	13° N	5,49	5,94	5,15	4,97	4,74	4,79	5,03	5,72	5,77	5,46	4,74	5,25	5,25	1,21

Irradiação Solar no Plano Inclinado – Diamantina-Diamantina, MG-BRASIL

18,201° S; 43,549° O

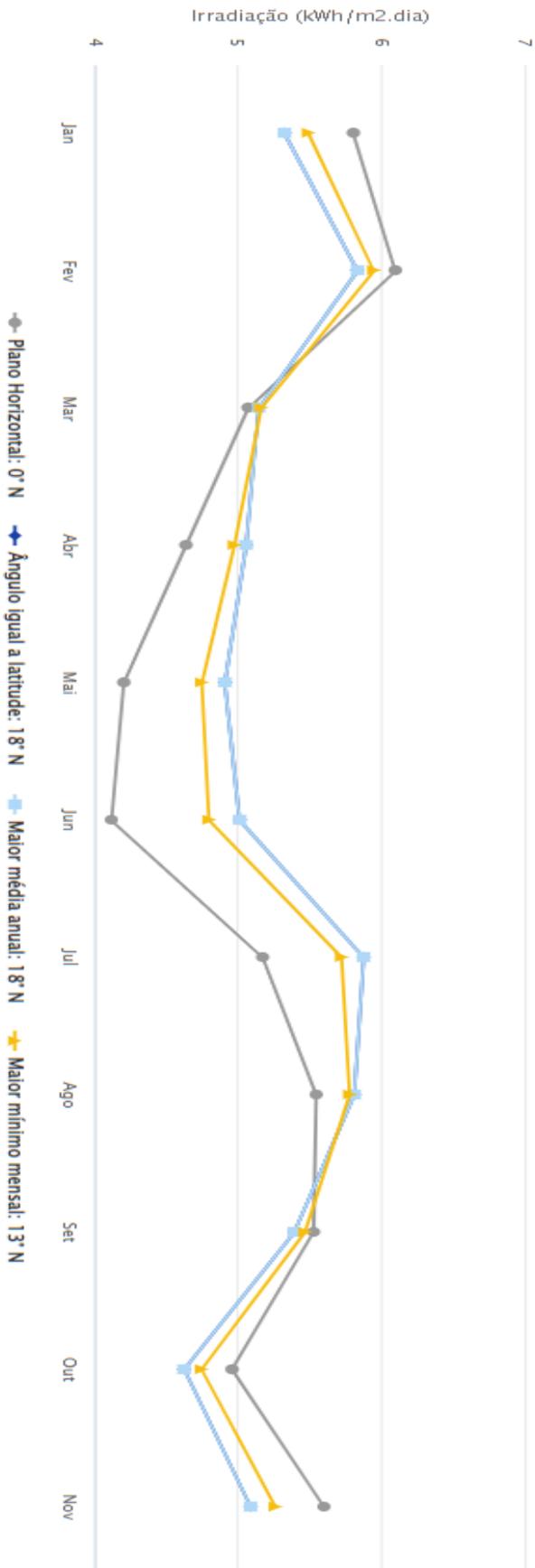


Figura 6 – Irradiação Solar na Cidade de Diamantina-MG (CRESESB, 2022).

7. Conclusão

Devido à crescente expansão da tecnologia, encontrar meios mais eficientes de geração de energia é a melhor alternativa para evitar a limitação desta expansão. A energia solar fotovoltaica se prova como uma excelente forma de geração de energia. Esse fato se dá, pois, a mesma não causa danos ao meio ambiente e tem uma alta eficiência energética.

O presente trabalho estudou apenas o dimensionamento de uma usina solar, não focando na viabilidade econômica de tal investimento. Para a viabilidade econômica é exigido outro trabalho, o que possibilita um foco maior em cada tema. Isso, então, deixa um espaço para um futuro trabalho de pesquisa sobre a viabilidade econômica da instalação de uma usina solar fotovoltaica no Campus JK.

References

- ABSOLAR – Brazilian Association of Photovoltaic Solar Energy, 2022. *Solar energy exceeds 20 GW installed and should become the second largest source in the country*. [online] Available at: <<https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-passa-de-20-gw-instalados-e-deve-se-tornar-segunda-maior-fonte-do-pais/>>. [Accessed 27 October 2022].
- Alves, M. de. O.L., 2019. *Solar Energy - study of electricity generation through on-grid and off-grid photovoltaic systems*. Monograph, Federal University of Ouro Preto. Available at: <https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2019/6/MONOGRAFIA_EnergiaSolarEstudo.pdf> [Accessed 17.10.2022].
- Antoniolli, A.F.G., 2015. *Performance Evaluation of Photovoltaic Solar Generators Connected to the Electric Grid in Brazil*. Master's Dissertation. Federal University of Santa Catarina. Available at: <https://fotovoltaica.ufsc.br/Dissertacoes/Dissertacao_Andrigo_Filippo_Gon%C3%A7alves.pdf> [Accessed 21 June 2022].
- Antoniolli, A.F.G., Lucas, G., Montenegro, A.A. and Rüther, R., 2015. *PV virtual power plant: Evaluating the performance of clustered x individual rooftop PV installations*. In: Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2019, p. 1848–1856, 2020.
- Beltrão, R.E. de. A., 2008. *Effect of Temperature on the Energy Generation of Photovoltaic Modules Submitted to Different Climatic Conditions - case studies for the locations of Recife and Araripina*. DEd. Federal University of Pernambuco. Available at: <https://attena.ufpe.br/bitstream/123456789/9740/1/arquivo8636_1.pdf> [Accessed 06.06.2022].
- Canadian Solar, 2022. *Products and Solutions*. [online]. Available at: <<https://www.csisolar.com/br/module/>> [Accessed 06 October 2022].
- CRESESB – Reference Center for Solar and Wind Energy Sérgio de S. Brito, 2022. Ministry of Mines and Energy. Solar Potential - sundata v3.0. [online] Available at: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>> [Accessed 27 October 2022].
- Energia Solar, 2018. *Types of Photovoltaic Panels - description and performance*. [online] Available at: <<https://pt.solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/painel-fotovoltaico/tipos>> [Accessed 23 June 2022].
- Engineering Learn, 2022. *Types of Solar Panels*. Engineering Learn. Available at: <<https://engineeringlearn.com/types-of-solar-panels/>> [Accessed 22 June 2022].
- Esposito, A.S. and Fuchs, P.G., 2013. *Technological development and insertion of solar energy in Brazil*. Brazil: BNDS.
- Figueira, F., 2014 *Dimensioning of a photovoltaic system connected to the grid to power the computing room of the municipal school Tenente Antônio João*. Completion of Course Work, Federal University of Rio de Janeiro.
- HCC Energia Solar, 2022. *See the factors that influence the efficiency of the photovoltaic system*. [online] Available at: <<https://hccenergiasolar.com.br/veja-os-fatores-que-influenciam-na-eficiencia-do-sistema-fotovoltaico/>> [Accessed 06 July 2022].
- Jardim, C. da S., 2007. *The Insertion of Photovoltaic Solar Generation in Urban Feeders*

- Focusing on Reducing Daytime Peak Demand*. Doctoral Thesis, Federal University of Santa Catarina. Available at: <https://fotovoltaica.ufsc.br/Teses/Tese_Carolina_da_Silva_Jardim.pdf> [Accessed 21.06.2022].
- Malamut, R.B., 2017. *Dimensioning of a Photovoltaic System: case study of the revitalization of a building*. 2017. Graduation monograph. Federal University of Rio Grande do Sul. Available at: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/169816/001051388.pdf?sequence=1>> [Accessed 27.10.2022].
- Nascimento, Á.D.J., 2019 *Distributed Photovoltaic Generation as a Subsidiary Element for Energy Storage Systems in a Differential Tariff Environment*. Master's Dissertation, Federal University of Santa Catarina. Available at: <https://fotovoltaica.ufsc.br/Dissertacoes/Dissertacao_Alvaro_Nascimento.pdf> [Accessed 08.06.2022].
- Neosolar, 2022. *Photovoltaic Solar Energy Systems and their Components*. [online] Available at: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>> [Accessed 21 June 2022].
- Ndiaye, A., Charki, A., Kobi, A., Kébé, C.M.F., Ndiaye, P.A. and Sambou, V., 2013. *Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review*. Solar energy, 96, pp.140-151. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.07.005>
- Nova TV Show, 2022. *Photovoltaic Solar Inverter on Grid Inverter Max75kV3-1v 75kw Triphasic 380v 7mppt 14 Inputs Monitoring*. [online] Available at: <<https://www.novatvshow.com.br>> [Accessed 05 October 2022].
- Oliveira, R.P. de., 2019. *Didactic Workbench for Off-Grid Photovoltaic System*. Graduation monograph. Federal University of Ouro Preto. Available at: <https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1933/1/MONOGRAFIA_BancadaDid%C3%A1ticaSistema.pdf> [Accessed 27 October 2022].
- Pinho, J. T. and Galdino, M. A., 2014. *Engineering Manual for Photovoltaic Systems*. [e-book] Rio de Janeiro: Cepel - Cresesb. Available through: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf> [Accessed 06 June 2022].
- Pires, D. H., 2015. *The Feasibility of Deploying Photovoltaic Panels in Republics*. Graduation monograph. Federal University of Ouro Preto, Ouro Preto. Available at: <https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1175/1/MONOGRAFIA_ViabilidadeImplants%C3%A7%C3%A3oPainel.pdf> [Accessed 08 September 2022].
- Reich, N.H., Mueller, B., Armbruster, A., Van Sark, W.G.J.H.M., Kiefer, K. and Reise, C., 2012. *Performance ratio revisited: is pr > 90% realistic?*. Progress in Photovoltaics, 2(6), pp.717-726. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.1219>
- Ribeiro, R.P., 2016. *Case Study: design of a residential photovoltaic system*. Doctoral thesis. Federal Center for Technological Education of Minas Gerais. Available at: <<https://www.eng-automacao.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/152/2018/01/Tcc-Raylla-1.pdf>> [Accessed 27 October 2022].
- Ribsol, 2022. *Photovoltaic Systems: more energy and comfort. More Energy and Comfort*. [online] Available at: <<https://ribsol.com.br/sistemas-fotovoltaicos/>> [Accessed 21 June 2022].
- Silva, M.S., 2017. *Solar Energy: photovoltaic panels project for UEPB Campus VII*. 2017. Graduation monograph. Federal University of Campina Grande. Available at: <<http://dSPACE.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/18793/1/MARIANE%20SAMPAIO%20SILVA%20-%20TC%20ENG.%20EL%20c3%89TRICA%202017.pdf>> [Accessed 22 September 2022].
- Sirius, 2021. *On grid solar energy system: understand how it works*. [online] Available at: <<https://energiasirius.com/sistema-on-grid/>>. [Accessed 21 June 2022].
- Solar Plenitude, 2022. *Grid Tie Inverter*. [online] Available at: <<https://plenitudesolar.com.br/inversor-grid-tie/>> [Accessed 14 October 2022].
- Torres, R.C., 2012. *Photovoltaic Solar Energy as an Alternative Source of Electric Energy Generation in Residential Buildings*. Doctoral thesis. School of Engineering of São Carlos. Available at:

<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18147/td-e-18032013-091511/publico/dissertacao_final_rct.pdf> [Accessed 21 September 2022].

Zilles, R., Macêdo, W.N., Galhardo, M.A.B. and Oliveira, S.H.F. de., 2012 *Photovoltaic Systems Connected to the Electric Grid*. Brazil: Oficina de Textos.