

## **Estudo comparativo da eficiência de sistemas fotovoltaicos com diferentes orientações e inclinações instalados na cidade de Ituiutaba-MG**

## **Comparative study of the efficiency of photovoltaic systems with different orientations and inclinations installed in the city of Ituiutaba-MG**

DOI:10.34117/bjdv7n7-216

Recebimento dos originais: 07/06/2021

Aceitação para publicação: 08/07/2021

### **Saulo de Moraes Garcia Júnior**

Mestre em Engenharia Elétrica-UFU  
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)  
Rua Vereador Geraldo Moisés da Silva, s/n, Universitário, Ituiutaba – MG  
saulo.junior@uemg.br

### **Johnny Emmanuel Nogueira**

Graduando em Engenharia Elétrica  
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)  
Rua Vereador Geraldo Moisés da Silva, s/n, Universitário, Ituiutaba – MG  
johnny.emmanuel@hotmail.com

### **Alan Kardec Candido dos Reis**

Mestre em Sistemas de Energia-UFU  
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)  
Rua Vereador Geraldo Moisés da Silva, s/n, Universitário, Ituiutaba – MG  
alan.reis@uemg.br

### **Adriana de Souza Guimarães**

Mestre em Ciência da Computação-UFU  
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)  
Rua Vereador Geraldo Moisés da Silva, s/n, Universitário, Ituiutaba – MG  
adriana.guimaraes@uemg.br

## **RESUMO**

Em decorrência às severas mudanças climáticas, ocasionadas pela ação do homem, um grande esforço tem sido feito nas últimas décadas, por parte da comunidade científica e governos de forma geral ao redor do mundo, para se desenvolver maneiras sustentáveis de geração energética. A tecnologia fotovoltaica tem ganhado cada vez mais espaço no mercado internacional e ela se destaca como a mais promissora devido aos incentivos governamentais e à contínua redução no seu valor de mercado. No Brasil, após a publicação da Resolução Normativa 482/2012 pela ANEEL, por exemplo, a instalação de geradores fotovoltaico residenciais se tornou extremamente atrativo devido ao sistema de compensação de energia. Diferentes modelos de células fotovoltaicas são desenvolvidos e testados em laboratórios constantemente, com o intuito de aumentar sua eficiência e reduzir o custo de fabricação o tanto quanto possível. Hoje já é possível encontrar opções

emergentes tais como células de multijunção (silício amorfo, disseleneto de cobre e índio; telureto de cádmio; disseleneto de cobre, índio e gálio), módulos de filme fino, células sensibilizadas por corante (dye-sensitized solar cell, ou DSSC) e células baseadas em pontos quânticos. Entretanto, o modelo dominante no mercado são os módulos de silício cristalino. Existem diversas opções de marcas e modelos que geralmente diferem entre si apenas nos níveis de potência. Seus comportamentos quanto às variações climáticas são bastante similares e a diferença entre os níveis de eficiência dos módulos não é muito grande. Os geradores fotovoltaicos podem possuir diferentes topologias e arquitetura de montagens que dependem da necessidade em questão. No Brasil, o tipo mais comum é o sistema fotovoltaico conectado à rede e para se realizar o seu dimensionamento alguns fatores importantes devem ser levados em conta. Perdas podem ocorrer no processo de condução e conversão de energia e eventos como a sujidade dos módulos devem ser considerados antecipadamente nos cálculos. A temperatura de operação dos módulos é um dos fatores mais importantes a ser considerado pois a eficiência das células reduz com o aumento de sua temperatura. Outro ponto extremamente importante que também deve ser levado em conta é a posição dos módulos em relação ao Sol, pois dependendo da orientação e inclinação em que eles são instalados, menos radiação solar é captada e consequentemente a geração é afetada. O objetivo deste trabalho é avaliar as perdas devido à orientação e inclinação de sistemas fotovoltaicos instalados na cidade de Ituiutaba, Minas Gerais. Será feita uma simulação no software PVSyst de um sistema idealmente instalado na cidade e em seguida, através de índices de mérito, sua geração será comparada com a energia produzida em sistemas reais de diferentes configurações instalados na mesma cidade. Os dados de energia gerada foram obtidos através do monitoramento dos sistemas.

**Palavras-chave:** Tecnologia fotovoltaica, Dimensionamento de um sistema fotovoltaico, Perdas devido à orientação e inclinação.

## ABSTRACT

Due to the severe climatic changes, caused by the action of man, a great effort has been made in the last decades, by the scientific community and governments in general around the world, to develop sustainable ways of energy generation. Photovoltaic technology has been gaining more and more space in the international market and it stands out as the most promising due to government incentives and the continuous reduction in its market value. In Brazil, after the publication of the Normative Resolution 482/2012 by ANEEL, for example, the installation of residential photovoltaic generators became extremely attractive due to the energy compensation system. Different models of photovoltaic cells are constantly developed and tested in laboratories, with the aim of increasing their efficiency and reducing the manufacturing cost as much as possible. Today it is already possible to find emerging options such as multijunction cells (amorphous silicon, copper and indium diselenide; cadmium telluride; copper, indium and gallium diselenide), thin film modules, dye-sensitized solar cells, or DSSC and cells based on quantum dots. However, the dominant model in the market is crystalline silicon modules. There are several brand and model options that generally differ only in power levels. Their behavior due to climatic variations is very similar and the difference between the levels of efficiency of the modules is not very large. Photovoltaic generators can have different topologies and assembly architecture that depend on the need in question. In Brazil, the most common type is the photovoltaic system connected to the grid and in order to carry out its design some important factors must be taken into account. Losses can occur in the process of conducting and converting energy and events such as dirt on top of the modules

must be considered in advance in the calculations. The operating temperature of the modules is one of the most important factors to be considered as the efficiency of the cells decreases with increasing temperature. Another extremely important point that must also be taken into account is the relative position of the modules to the Sun, because depending on the orientation and inclination in which they are installed, less solar radiation is captured and consequently the generation is affected. The objective of this essay is to evaluate the losses due to the orientation and inclination of photovoltaic systems installed in the city of Ituiutaba, Minas Gerais. A simulation will be made in the PVSyst software of a system ideally installed in the city and then, through merit indexes, its generation will be compared with the energy produced in real systems of different configurations installed in the same city. The generated energy data was obtained through the monitoring of the systems.

**Keywords:** Photovoltaic technology, Photovoltaic system dimensioning, Losses due to orientation and inclination.

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas têm-se aumentado consideravelmente as discussões sociopolíticas a respeito das mudanças climáticas ocasionadas devido a atividade humana e suas consequências para o meio ambiente. Um dos principais tópicos desta discussão é a busca por recursos energéticos renováveis capazes de suprir a demanda, cada vez mais crescente, sem agredir de forma tão severa o bioma terrestre. Soluções formidáveis como as turbinas eólicas, hidrelétricas de pequeno porte, usinas maremotriz, usinas movidas a biomassa (resíduos de indústrias ou resíduos rurais) e até mesmo energia solar térmica apresentam resultados satisfatórios para o abastecimento residencial e de pequenos centros consumidores. Uma das alternativas mais promissoras para o futuro é a energia solar fotovoltaica: eletricidade gerada a partir da radiação solar.

O Brasil possui um expressivo potencial solar a disposição. Devido à sua posição geográfica, os níveis de radiação solar global são maiores do que os países do continente europeu, por exemplo, onde a tecnologia fotovoltaica tem sido empregada extensivamente nas últimas décadas. No local menos ensolarado do território brasileiro é possível gerar mais eletricidade do que no local mais ensolarado da Alemanha. O rendimento energético anual máximo (medido em kWh de energia elétrica gerada por ano para cada kWp de potência fotovoltaica instalada) em todo território nacional, considerando-se um desempenho médio de 80% para os geradores fotovoltaicos. (PEREIRA, MARTINS, et al., 2017)

Entretanto, devido a sua extensa rede hidrográfica, a matriz elétrica brasileira é majoritariamente composta por usinas hidrelétricas. O Gráfico 1 apresenta a distribuição

das fontes de eletricidade. Mais de 60% da geração nacional provém de fontes hídricas, enquanto a geração fotovoltaica é de apenas 1,73%. É importante destacar que a eletricidade proveniente de fontes não renováveis representa apenas 17,89%, somando-se as porcentagens de combustíveis fósseis e nuclear (1,14%). No quesito sustentabilidade, o Brasil se destaca em se tratando de geração elétrica.

Após a publicação da Resolução Normativa 482/2012 ( ANEEL, 2012) e sua posterior revisão com a Resolução Normativa 687/2015 ( ANEEL, 2015) a ANEEL permitiu a criação de um sistema de compensação de energia elétrica. Ou seja, é permitido o acesso de microgeração<sup>2</sup> e minigeração<sup>3</sup> distribuída às redes elétricas das concessionárias, desde que os geradores sejam oriundos de fontes renováveis. Desta forma, toda energia fornecida à rede pelo sistema da unidade geradora é “emprestada” gratuitamente a distribuidora local e depois compensada sobre o consumo de energia elétrica ativa desta mesma unidade ou até mesmo de duas ou mais instalações distintas, desde que respeitando a norma. Por exemplo, se no período em que foram feitas as leituras em uma residência que possui um gerador fotovoltaico constatar-se um consumo de 350kWh e um valor de energia injetado de 400kWh, será gerado um crédito de 50kWh que ficará disponível por um período de 60 meses. A geração distribuída, especialmente a fotovoltaica, se tornou, pois, um investimento extremamente atrativo, uma vez que após instalado e homologado o sistema corretamente dimensionado, o valor pago à concessionária se resume aos custos de disponibilidade somados ao de iluminação pública. Em um período que geralmente varia de 3 a 5 anos, o investimento inicial é recuperado devido à economia gerada pela compensação de energia e o consumidor proprietário do sistema não precisa se preocupar com valores altos na fatura de energia. Por esse motivo, o Brasil tem experimentado um expressivo aumento na participação da geração fotovoltaica em sua matriz elétrica. Ao se observar a Tabela 1 é possível perceber um aumento de 6.649 GWh em geração por energia solar entre o ano de 2012 e 2019 e mesmo assim, em 2019, este valor representava apenas 1,1% de participação na geração de eletricidade no Brasil. Ou seja, ainda existe um espaço muito grande para crescimento.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 RECURSO ENERGÉTICO SOLAR**

O Sol é a estrela central do nosso Sistema Solar e é a fonte de praticamente toda a energia utilizada na Terra. É a partir dele que ocorrem os ciclos hídricos, possibilitando o represamento dos rios e por consequente a construção de hidrelétricas; é por meio da

energia térmica do sol que se originam as diferentes massas de ar, gerando as correntes de vento e possibilitando a geração eólica; recursos fósseis tais como petróleo, carvão e gás natural se formaram a partir dos restos orgânicos de plantas e animais que se aproveitaram da energia solar no seu desenvolvimento, assim como, por exemplo, a cana-de-açúcar, realizando fotossíntese, para posteriormente ser transformada em combustível. (PINHO e GALDINO, 2014)

A radiação solar, isto é, a quantidade de energia que o sol emite por unidade de área que é diretamente exposta à luz solar e perpendicular a ela, é 1 368 watts por metro quadrado ( $W/m^2$ ) na camada mais externa da atmosfera terrestre. Esta medida é chamada de constante solar. No entanto, devido ao formato esférico da Terra e à composição de sua atmosfera, a média anual ao redor de toda sua superfície é de apenas  $342 W/m^2$ . Esta radiação que atinge a superfície terrestre possui duas componentes: direta e difusa. Radiação direta incide diretamente sobre a superfície, sem sofrer qualquer influência. Já a radiação difusa atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre. No total, o Sol oferece cerca de 885 milhões de Terawatthoras (TWh) por ano, o que representa 6 200 vezes a energia comercial primária consumida pela humanidade em 2008. Em outras palavras, o Sol precisa de 1 hora e 25 minutos para nos enviar a quantidade de energia que nós atualmente consumimos em um ano. (IEA, 2011; PINHO e GALDINO, 2014)

Uma das formas bastante utilizada para se aproveitar do recurso solar são os aquecedores de água residenciais, comumente utilizados em chuveiros e/ou piscinas, visando a redução do gasto com energia elétrica. Os principais componentes deste modelo de aquecedor são o coletor e o reservatório térmico. No coletor, a energia térmica provinda do Sol é captada e transferida para a água, que logo em seguida é armazenada no reservatório térmico que está conectado à rede hidráulica da instalação. A Figura 3 ilustra este tipo de sistema.

Outro método utilizado no aproveitamento do recurso solar são as usinas de energia solar térmica concentrada (CSP – do inglês, Concentrated Solar Power), que são basicamente constituídas de superfícies refletoras idealmente posicionadas para concentrar a radiação solar e aquecer fluidos, como a água, gerando vapor a altas temperaturas. Seu funcionamento é similar ao das termoeletricas convencionais, pois o vapor gerado é utilizado para movimentar turbinas e gerar eletricidade. A maior destas usinas atualmente se encontra em Israel, no deserto de Negev e é denominada Ashalim (Figura 3). Ela é constituída por 50.600 espelhos controlados por computador, para

melhor aproveitamento da irradiação, distribuídos em uma área de 3km<sup>2</sup>, e possui capacidade instalada de 121 megawatts. ( KRESCH)

Com a tecnologia fotovoltaica, entretanto, é possível gerar eletricidade a partir da luz. Devido a características específicas, alguns materiais semicondutores, quando expostos à luz solar, são capazes de gerarem correntes elétricas. A princípio, devido ao seu alto custo de fabricação e instalação, esse tipo de sistema era utilizado apenas para aplicações em satélites. Entretanto, com incentivos governamentais e com o avanço das técnicas de fabricação e consequente redução do valor de mercado, é cada vez mais comum encontrar tanto residências, quanto comércios e até mesmo grandes indústrias investindo em sistemas fotovoltaicos para seu próprio abastecimento.

## 2.2 QUANTIFICAÇÃO DA ENERGIA SOLAR

O significado do termo “radiação solar” pode ser ramificado em diferentes vertentes, de acordo com o que está sendo referenciado. Ele pode ser utilizado para expressar fluxo de potência e neste caso deve ser especificamente denominado de irradiância solar. É possível que ele também seja utilizado em termos de energia por unidade de área, denominado neste caso de irradiação solar. Existem diversas unidades para se representar valores de radiação: W/m<sup>2</sup> (Watts por metro quadrado), J/cm<sup>2</sup> (Joule por centímetro quadrado), cal/cm<sup>2</sup>.min (calorias por centímetro quadrado minuto), kWh/m<sup>2</sup> (kilowatt hora por metro quadrado), entre outras. Para este trabalho, a unidade mais importante é kWh/m<sup>2</sup>.dia (kilowatt hora por metro quadrado dia), ou seja, a quantidade de energia mensurada em kWh recebida por uma superfície de 1 metro quadrado durante o período de 1 dia. ( PINHO e GALDINO, 2014)

As características elétricas dos módulos fotovoltaicos estão intrinsecamente relacionadas com condições de irradiância e de temperatura do local de instalação, sendo que a primeira influencia de maneira muito mais expressiva o funcionamento das células. A irradiância pode sofrer variações em intervalos de tempo muito curtos, mas a variação da temperatura é amenizada pela capacidade térmica dos módulos ( PINHO e GALDINO, 2014). O gráfico 2 mostra as variações na potência de um gerador fotovoltaico durante o dia devido a esta variabilidade da irradiância solar. Nos cálculos de dimensionamento de um projeto, convém ignorar os efeitos de variação da irradiância a cada instante e considerar a totalidade da energia recebida em intervalos horários. Um dos métodos mais adequados para se expressar o valor acumulado de energia solar ao longo do dia é o conceito de Horas de Sol Pleno ou Horas de Sol Pico (HSP). Esta grandeza é expressa em

kWh/m<sup>2</sup>.dia e reflete o número de horas do dia em que a irradiação solar permanece com um valor igual a 1kWh/m<sup>2</sup> ( PINHO e GALDINO, 2014). Por exemplo, para Ituiutaba, a média anual de irradiação solar para um plano horizontal é 5,26 HSP ( Potencial Solar - SunData v3.0). Isto significa que em média, diariamente durante o ano inteiro, por um período de 5,26 horas ou 5 horas e 15 minutos aproximadamente, a irradiação solar incidente sobre um plano horizontal atinge o valor de 1kWh/m<sup>2</sup>.

### 2.3 HISTÓRICO DA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

Em 1839, enquanto realizava experimentos com eletrodos, Alexandre Edmond percebeu os efeitos da energia solar e notou que com a luz do sol era possível obter energia elétrica. Em seu experimento, placas metálicas, de platina e prata, eram mergulhadas em um eletrólito e quando expostas à luz produziam uma pequena diferença de potencial. Energia solar fotovoltaica: origem e importância para os dias atuais). O fenômeno, posteriormente denominado de efeito fotovoltaico, foi explicado em 1905 por um então desconhecido examinador assistente do Escritório Suíço de Patente, Albert Einstein, que recebeu um Prêmio Nobel pelo feito em 1921. ( IEA, 2011)

As primeiras patentes para células solares foram arquivadas por volta de 1920 por Walter Snelling e Walter Schottky. Em 1954, Darryl Chapin, Calvin Fuller e Gerald Pearson, associados da Bell Labs, inventaram a célula solar de silício para aplicações energéticas em satélites – um exemplo extremo de demanda remota de energia desconectada da rede. No começo da década de 1970, a tecnologia fotovoltaica foi adaptada para aplicações terrestres por Elliot Berman. ( IEA, 2011)

### 2.4 FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

Atualmente existem diferentes modelos de células fotovoltaicas disponíveis no mercado e mais algumas novas tecnologias sendo desenvolvidas em laboratórios. Elas diferem entre si de acordo com a arquitetura, estrutura de montagem e materiais utilizados, mas basicamente funcionam pelo mesmo princípio: diferença de potencial criada entre duas camadas de materiais semicondutores. No capítulo 3.6 serão apresentadas estas opções e neste capítulo será dado enfoque para as células de silício cristalino, que constituem os módulos estudados por este trabalho

O material base para a confecção de um módulo fotovoltaico são os semicondutores. A luz solar que incide sobre esses materiais, como por exemplo o silício, é capaz de gerar lacunas de elétrons em uma interface de camada dupla conhecida como

junção p-n. A camada n (um tipo n de semicondutor, assim nomeado devido ao excesso de cargas negativas) é dopada com um excesso de impurezas compostas por materiais que são doadores de elétrons. A camada p (um tipo p de semicondutor, assim nomeado devido ao excesso de cargas positivas) é dopada com um excesso de impurezas compostas por materiais que estão com lacunas de elétrons, ou seja, carregados positivamente. Quando um material do tipo n e um material do tipo p são colocados em contato, elétrons livres do lado tipo n e lacunas do lado tipo p irão se difundir pela interface, balanceando as cargas. Esse balanceamento da interface altera as cargas estáveis dos materiais dopantes que antes balanceavam as cargas dos elétrons livres e das lacunas, gerando um campo elétrico na região da interface, que impede difusões futuras. (AMATYA, 2015). Assim, cargas negativas são criadas em um lado da interface e cargas positivas são criadas no outro lado (Figura 5), resultando em uma diferença de potencial. Quando os dois lados da célula iluminada são conectados a uma carga, uma corrente flui de um lado do dispositivo através da carga para o outro lado da célula (ARVIZU, 2012). Isso ocorre devido ao efeito fotoelétrico, onde a luz concentrada em “pacotes” (fótons), é absorvida pelos elétrons livres. Caso os fótons carreguem energia suficiente, o elétron é separado do átomo, criando assim, a corrente elétrica (CAVALCANTE e TAVOLARO, 2002). A eficiência na conversão de uma célula solar é definida como a razão entre a potência de saída e radiação solar incidente sobre uma área unitária ( $W/cm^2$ ). A máxima eficiência de uma célula solar depende das propriedades de absorção do material e do modelo de construção do dispositivo. Uma técnica capaz de aumentar esta eficiência é abordagem de multijunção que empilha materiais absorvedores selecionados que conseguem captar mais do espectro solar uma vez que cada material é capaz de captar fótons de diferentes comprimentos de onda. (ARVIZU, 2012)

## 2.5 OSCILACIONES SOLARES E ALGUNS CONCEITOS IMPORTANTES

As variações da incidência solar e sua disponibilidade estão diretamente relacionados à fenômenos astronômicos. A duração do dia e a quantidade de energia recebida em um ponto qualquer da superfície terrestre se alteram periodicamente em consequência a dois ciclos: o ciclo anual e o ciclo diário. O ciclo anual ocorre devido a inclinação da Terra com relação à sua órbita em torno do Sol. Já o ciclo diário, está ligado ao movimento de rotação da Terra em torno de seu eixo (PEREIRA, MARTINS, et al., 2017).

## 2.6 DIFERENTES TÉCNICAS NA CONFECÇÃO DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Dentre as tecnologias da terceira geração, destacam-se as células orgânicas, as células sensibilizadas por corante ou dye-sensitized solar cell (DSSC) e as células baseadas em pontos quânticos ou quantum dots. As células orgânicas são constituídas por meio da ligação de dois layouts principais, onde ocorre a geração de corrente elétrica: um deles é doador de elétrons e o outro é receptor de elétrons ( NAKANO, 2017). O princípio de funcionamento das células DSSC se resume na utilização de um corante com a propriedade de transferir um elétron no estado de excitação para um óxido semiconductor ( MACHADO e MIRANDA, 2014). Já a tecnologia de pontos quânticos utiliza nanocristais semicondutores com tamanho reduzido de tal forma que apresentam características quânticas e comportamentos ótico-eletrônicos específicos ( NAKANO, 2017).

O processo de fabricação dos módulos de filme fino ocorre por meio da deposição de camadas milimétricas de semicondutores fotoativos em um substrato. Os semicondutores comumente utilizados são o silício amorfo, o disseleneto de cobre e índio (CSI), o telureto de cádmio (CdTe) e o disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS). As células de silício amorfo passam por um processo de hidrogenação, preenchendo lacunas em ligações pendentes e dessa forma beneficiando sua eficiência. Já as células CSI, CdTe e CIGS são fabricadas com a técnica de junção múltipla, com o intuito de acrescer a eficiência da célula, uma vez que a capacidade de absorção do espectro solar é aumentada ( NAKANO, 2017).

As células da primeira geração por sua vez são formadas de silício cristalino e podem ser de dois tipos: silício monocristalino (c-Si) ou multicristalino (m-Si), também chamado de policristalino. No primeiro caso, os módulos são fabricados com um único cristal em um processo denominado extração de cadinho, onde o núcleo do cristal com orientação definida é imerso em um banho de silício fundido e retirado enquanto roda lentamente ( COSTA, 2010). De acordo com GREEN, DUNLOP, et al., 2020 a maior eficiência registrada deste tipo de célula é da empresa japonesa Kaneka, com 26,7% de eficiência e módulo com a mais alta eficiência é da mesma empresa, registrando 24,4% de eficiência.

As células policristalinas são produzidas através do processo de fundição de lingotes, onde blocos de silício são criados por aquecimento à vácuo e posterior arrefecimento. Em seguida, eles são dopados com as impurezas. A maior eficiência de

uma célula registrada, segundo GREEN, DUNLOP, et al., 2019 é da Associação Fraunhofer, na Alemanha, com 22,3% de eficiência. O módulo com maior eficiência é da sul coreana Hanwha Q Cells, com 20,4% ( GREEN, DUNLOP, et al., 2020).

O mercado atualmente é dominado pela tecnologia do silício cristalino, tanto monocristalino quanto policristalino, sendo que, até 2009, 80% dos painéis comercializados pertenciam a esta categoria ( ARVIZU, 2012). Eles são constituídos por módulos de células conectadas em série por filamentos condutores e encapsuladas em folhas de acetato de vinil etileno (EVA). Este conjunto, em seguida, recebe uma cobertura frontal de vidro temperado e uma proteção, na parte posterior, de um filme de fluoreto de polivinila (PFV), conhecido como Tedlar®. Essa estrutura laminada é montada em um perfil metálico, na maioria das vezes de alumínio ( MACHADO e MIRANDA, 2014).

## 2.7 DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

No presente trabalho, serão avaliadas as etapas de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede compostos por módulos de silício cristalino instalados sobre telhados cerâmicos e metálicos que utilizam inversores multi-string centralizados. Projetos compostos por tecnologias e condições de instalações diferentes requerem abordagens diferentes, respeitando suas especificidades.

## 2.8 CUSTO DE DISPONIBILIDADE

Custo de Disponibilidade, também conhecido como Tarifa ou Taxa Mínima, constitui o valor no faturamento da conta de energia referente à disponibilidade da rede elétrica para o uso do cliente. Ou seja, mesmo que não haja consumo em determinado ciclo de medição, o usuário final deverá pagar este valor à concessionária pois ele é beneficiário de toda sua infraestrutura de fornecimento. ( O que é Custo de Disponibilidade e por que ele impede que a conta de luz seja zerada, 2020)

Aos consumidores pertencentes ao grupo A, conectados em alta tensão, o Custo de Disponibilidade é definido pela ANEEL como a parcela da fatura correspondente à demanda contratada. Para os consumidores do grupo B, com fornecimento em baixa tensão, o Custo de Disponibilidade depende da instalação do local: ( O que é Custo de Disponibilidade e por que ele impede que a conta de luz seja zerada, 2020)

- Instalação Monofásica: custo correspondente ao consumo de 30 kWh;
- Instalação Bifásica: custo correspondente ao consumo de 50 kWh;
- Instalação Trifásica: custo correspondente ao consumo de 100 kWh;

Para os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (On-Grid) este custo de disponibilidade deve ser considerado nos cálculos de dimensionamento, pois ainda que o gerador forneça a quantidade de energia referente à demanda total, o valor deste custo será cobrado na fatura de energia. Ou seja, o consumo referente ao custo de disponibilidade deve ser abatido da média de consumo real para que o sistema não fique sobre dimensionado, resultando em custos desnecessários.

## 2.9 ENERGIA DE COMPENSAÇÃO

A energia de compensação representa o valor de referência para os cálculos do dimensionamento: é a média mensal do consumo abatida do custo de disponibilidade.

A Resolução Normativa 687 da ANEEL ( ANEEL, 2015) permite que mais de uma instalação seja cadastrada no mesmo sistema de compensação, desde que sejam cadastradas na mesma concessionária. Ou seja, o gerador instalado em um local pode enviar energia para outra instalação de um local diferente, podendo ser até mesmo de outra cidade. Dessa forma, para os casos com mais de uma instalação participantes na compensação, devem ser considerados o custo de disponibilidade de todas elas, assim como na média mensal do consumo deve estar incluso o consumo de todas as instalações.

## 2.10 POTÊNCIA DE PICO DO GERADOR

Um dos parâmetros mais importantes para se avaliar a performance de uma célula ou módulo fotovoltaico é o ponto de máxima potência  $P_{max}$ . Outro parâmetro importante, a eficiência da conversão energética  $\eta$ , é proporcional a  $P_{max}$ , ao total de irradiância incidente  $G$  e à área  $A$  do dispositivo ( $\eta = P_{max}/AG$ ). No entanto, determinar  $P_{max}$  é complicado porque ele é uma função da distribuição solar espectral e da irradiância total sobre o dispositivo, da uniformidade espacial e temporal da irradiância e da temperatura do dispositivo. Devido à atmosfera terrestre e às diferentes condições climáticas referentes às localidades, esses fatores variam continuamente durante o tempo. Os problemas com as comparações entre as medições resultaram no conceito de condições padrões de teste, ou STC (do inglês, Standard Test Conditions), que consiste na temperatura, irradiação total e distribuição solar espectral sobre os quais as medições de performance são feitas. Para aplicações terrestres, as condições são: (Temperatura: 25°C; Irradiação total: 1000W/m<sup>2</sup> e Distribuição solar espectral de referência: AM1.5; ( MARKVART e CASTAÑER, 2003; BELUSSO e CAINELLI, 2001). Com o valor da energia de compensação em mãos, é possível calcular qual deverá ser a potência de pico

do gerador fotovoltaico, ou seja, a potência STC do gerador necessária para gerar a quantidade de energia demandada.

## 2.11 FATORES DE PERDAS

Segundo um estudo apresentado pela Sociedade Alemã de Energia Solar ( DGS, 2013) os seguintes fatores de perdas devem ser considerados no dimensionamento: sombreamento, sujidade, reflexão, variação do espectro AM 1.5, mismatch (descasamento), condições diferentes dos padrões de teste, perdas c.c, perdas na conversão de energia, perdas no inversor e perdas na fiação elétrica.

O sombreamento parcial dos módulos fotovoltaicos pode ocorrer devido a árvores, antenas, postes ou qualquer tipo de construção que se encontre próximo ao arranjo. Nos casos de estruturas instaladas no solo ou em lajes, até mesmo a própria arquitetura do sistema pode ocasionar sombreamento em módulos adjacentes. Ele também pode ocorrer de forma imprevisível, quando por exemplo algum objeto cai sobre o módulo ( ARAÚJO, RANK e BUENO, 2016). Este tipo de problema pode ser resolvido de diversas formas e a solução depende de alguns fatores como: modelo de módulo escolhido, a forma como os módulos serão instalados, o tipo de arranjo (conexão em série ou paralelo). Neste trabalho o problema de sombreamento parcial não será abordado em detalhes pois os casos estudados não apresentam este fator de perda.

A sujidade ocorre devido ao acúmulo de sujeira sobre os módulos e geralmente este fator possui um impacto maior em áreas industriais, com grande tráfego de automóveis ou com um clima seco. No entanto, para módulos instalados com uma inclinação mínima de 10°, geralmente a própria água da chuva é capaz de amenizar esta situação. Mas o recomendável é que inspeções regulares sejam feitas para avaliar a necessidade de uma limpeza manual. ( ARAÚJO, RANK e BUENO, 2016). Ainda que as células de um gerador sejam pertencentes à mesma linha de produção, é seguro dizer que elas apresentam diferenças sutis entre si, de forma que suas características elétricas podem apresentar pequenas divergências. Para os casos de geradores compostos por módulos de diferentes fabricantes, essas divergências podem ser ainda mais acentuadas. Esta ocorrência é denominada de descasamento de parâmetros, ou do inglês mismatch, e deve ser considerada no dimensionamento pois as células de menor fotocorrente limita a eficiência global do módulo fotovoltaico. ( ALMEIDA, 2012; ARAÚJO, RANK e BUENO, 2016). O fator de perda c.c está diretamente relacionado com as perdas ôhmicas nos condutores elétricos que fazem as conexões entre os módulos e entre o arranjo de

módulos com o inversor. Elas podem ser minimizadas adotando-se a menor distância possível entre as conexões e fazendo-se um dimensionamento adequado das seções nominais dos condutores. (ARAÚJO, RANK e BUENO, 2016)

A qualidade dos condutores elétricos, dos seus isolamentos e suas conexões são pontos importantíssimos na hora de se realizar a instalação dos sistemas fotovoltaicos, pois eles possuem uma estimativa de vida útil na faixa dos 25 anos. Inspeções periódicas da instalação também são importantes pois auxiliam na prevenção de danos mecânicos, tais como: condutores roídos por animais, deterioração por sobretensões ou por raios UV, envelhecimento natural. Atualmente grande parte dos kits de geradores fotovoltaicos incluem conectores MC-4, mostrado na Figura 14, que possui um mecanismo de engate rápido e foram especialmente desenvolvidos para o uso em sistemas fotovoltaicos, melhorando a qualidade da instalação, facilitando conexões e apresentando melhor durabilidade. (ARAÚJO, RANK e BUENO, 2016)

Dentro das perdas devido às condições diferentes dos padrões de testes, pode-se incluir: radiação solar, temperatura e variação no espectro AM 1.5. Os valores de radiação solar e temperatura de operação dos módulos, em sistemas instalados em ambientes abertos, diferem dos valores sob os quais os módulos são testados em laboratórios. Para o caso das variações na radiação solar, o método de Horas de Sol Pleno funciona satisfatoriamente para o dimensionamento de SFCRs. Já para diferenças na temperatura de operação, uma abordagem mais completa será apresentada mais adiante. A sigla AM 1.5, (do inglês air mass) representa a distribuição solar espectral de referência na qual são realizados os ensaios de caracterização dos módulos fotovoltaicos. Esse referencial foi obtido através da inferência da posição geográfica da radiação incidente e de condições atmosféricas determinadas através de modelagem matemática computacional, que incluem concentrações específicas de CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, turbidez, quantidade de água precipitável e pressão atmosférica característica ao nível do mar. (BELUSSO e CAINELLI, 2001)

Os inversores atuam através de chaves eletrônicas controláveis, constituídas de dispositivos semicondutores de potência. Elas podem atuar em estado de condução, comutação ou bloqueio, conduzindo o sinal em intervalos de tempo e dessa forma produzindo ondas alternadas. Para o caso SFCRs, comumente são utilizados inversores autocomutados do tipo fonte de tensão que operam com a estratégia de controle conhecida por Seguimento do Ponto de Potência Máxima (SPPM, ou do inglês, MPPT – Maximum Power Point Tracking). O mecanismo SPPM realiza o controle eletrônico das contínuas alterações nos níveis de tensão e corrente devido às mudanças nos níveis de radiação solar

e temperatura ( PINHO e GALDINO, 2014). Dentro das perdas no inversor, pode-se incluir as perdas por conversão de energia, que ocorrem nos estados de condução e comutação do chaveamento eletrônico, e as perdas no controle por SPPM.

## 2.12 PERDA POR TEMPERATURA

A eficiência de uma célula fotovoltaica depende muito de sua temperatura de operação e esta, por sua vez, depende diretamente de variáveis climáticas (temperatura ambiente, velocidade do vento local e radiação solar) e parâmetros que se relacionam com o tipo de instalação e material. ( DUBEY, SARVAIYA e SESHADRI, 2013)

A temperatura do módulo de silício cristalino, fabricado conforme a arquitetura apresentada na Figura 10 Figura 10 – Esquema de um módulo fotovoltaico de silício cristalino do capítulo 3.6, é sempre maior do que a temperatura ambiente, devido à cobertura de vidro que retém a radiação infravermelha. O aumento da temperatura resulta na redução do band gap da célula fotovoltaica. Isso leva ao aumento da corrente de curto-circuito, ISC, mas diminui a tensão de circuito aberto, VOC. A queda em VOC é mais significativa do que o aumento de ISC, resultando em perda na potência de saída do módulo. ( SHARMA e CHANDEL, 2013)

É uma equação explícita, que relaciona a temperatura do módulo  $T_c$  com a temperatura ambiente  $T_a$  e a irradiação solar incidente total  $GT$ . O parâmetro dimensional  $k$ , conhecido como coeficiente de Ross, é dado pela relação  $\Delta(T_c - T_a)/\Delta GT$ . Valores para  $k$  foram estimados na faixa de 0,02-0,04  $Km^2/W$ , mas estudos posteriores estenderam seu limite de acordo com o nível de integração e o tamanho do espaço para circulação do ar atrás dos módulos.

## 2.13 PERDA POR ORIENTAÇÃO E INCLINAÇÃO

De forma geral, para se otimizar a geração, os módulos devem estar orientados em direção à linha do equador e possuir uma inclinação igual à latitude do local de instalação ( PINHO e GALDINO, 2014). Cada localidade contém suas particularidades e não há como generalizar o cálculo para a implementação dos sistemas fotovoltaicos em edificações com telhados de orientação diferente da ideal. ( KALOGIROU, 2013 ). Conforme foi explicado no capítulo Erro! Fonte de referência não encontrada., a posição relativa do Sol com a Terra varia tanto durante o dia quanto no período de um ano. No entanto, a radiação solar será sempre maior em uma superfície que se encontra em uma posição perpendicular relativa aos raios solares, do que numa superfície horizontal das

mesmas dimensões ( Energia Fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projeto e instalações ).

Existem diversos modelos de correção para os valores de irradiação solar em planos inclinados e para este trabalho foram adotados os valores de irradiação média para uma inclinação igual à latitude, disponíveis na plataforma SunData do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, CRESEB ( Potencial Solar - SunData v3.0). São valores corrigidos a partir dos valores de irradiação no plano horizontal pelo método isotrópico de LIU e RICHARD, 1963 estendido por KLEIN, 1977.

Os valores da Tabela 14 são estimativas baseadas em estudos que avaliam o desempenho de sistemas com diferentes orientações azimutais ( NÓBREGA, LIMA, et al., 2018). Entretanto, esta avaliação é feita através de simulações computacionais para sistemas instalados em localidades distintas das avaliadas por este trabalho. Como os níveis de radiação e as condições climáticas podem variar bastante de acordo com as coordenadas geográficas, é interessante avaliar a eficiência de sistemas reais atuantes na cidade de Ituiutaba, onde futuros sistemas serão instalados, pois desta forma é possível fazer uma estimativa mais precisa das perdas que ocorrem devido às diferentes condições azimutais e variações do ângulo de inclinação.

#### 2.14 COMPENSAÇÃO DA POTÊNCIA DE PICO DO GERADOR

Após todas as perdas possíveis serem consideradas para o projeto, a potência de pico do gerador deve ser corrigida de acordo com as seguintes etapas:

- a) Calcular a temperatura de operação dos módulos através da equação (4);
- b) Corrigir a potência de pico do gerador devido as perdas por temperatura através da equação (5);
- c) Calcular a potência de pico do gerador de acordo com a equação (3), considerando o valor HSP corrigido pela inclinação, disponível pelo SunData, conforme especificado no capítulo 343.8.6;
- d) Corrigir a potência de pico do gerador novamente devido as perdas gerais.

#### 2.15 NÚMERO DE MÓDULOS E ESCOLHA DO INVERSOR

A escolha do modelo de módulo a se utilizar em um projeto composto por tecnologia de silício cristalino se resume basicamente aos critérios de custo e disponibilidade de espaço. Atualmente existem fornecedores que trabalham, por exemplo,

com módulos de potência na faixa de 375Wp a 440Wp. A diferença de preço entre modelos dessas duas faixas de potência é de 35%. Dependendo da disponibilidade de área para a instalação, os módulos de menor potência são uma boa opção com relação ao custo. No entanto, caso o local de instalação não comporte a quantidade de placas necessárias, uma boa alternativa é optar por módulos de maior potência, reduzindo o espaço necessário para a instalação. Para um projeto de 18,92kWp por exemplo, seriam necessários 51 módulos de 375Wp. Caso se optasse por um modelo de 440Wp, 43 módulos seriam suficientes. Essa diferença resultaria em uma redução de aproximadamente 16,32m<sup>2</sup> de área necessária para a instalação. Em função da redução na eficiência dos módulos em consequência do aumento de temperatura, é muito comum que o gerador fotovoltaico seja dimensionado com uma potência nominal acima da potência nominal de saída do inversor, pois mesmo que os níveis de radiação atinjam valores próximos de 1.000W/m<sup>2</sup>, a potência do gerador fotovoltaico dificilmente se aproxima de sua potência nominal. ( PINHO e GALDINO, 2014).

Existem ainda dois outros fatores que devem ser considerados no dimensionamento do inversor: a tensão e a corrente de entrada. Para o caso aqui estudado, com sistemas compostos por inversores centralizados multistring, a tensão de entrada é a soma das tensões dos módulos associados em série e dependendo da potência do sistema, podem haver mais de um arranjo com esse tipo de associação. Geralmente a corrente de entrada é a própria corrente nominal de operação dos módulos, devido a associação em série. Mas a corrente de um arranjo em série pode ser dividida ou somada, associando-se em paralelo dois ou mais arranjos de módulos conectados em série. Os arranjos, formas de conexão e disposição dos módulos irão depender dos parâmetros do inversor.

A máxima tensão do sistema pode acontecer durante o nascer do sol, quando o circuito ainda não se conectou à rede devido à baixa irradiância. Neste instante o circuito se encontra aberto e em consequência das baixas temperaturas, a tensão de circuito aberto atinge seu valor máximo. Os limites de tensão SPPM do inversor também devem ser respeitados, caso contrário a eficiência do inversor pode ser comprometida ou ele poderá ser desconectado por segurança. De acordo com PINHO e GALDINO, 2014. A tensão de máxima potência dos módulos para diferentes temperaturas pode ser estimadas pela equação 10, substituindo os parâmetros referentes à tensão de circuito aberto pelos da tensão de máxima potência. ( PINHO e GALDINO, 2014). Quanto aos limites de corrente, deve-se tomar cuidado com a quantidade de arranjos em série que podem ser conectados em paralelo ao SPPM do inversor.

### 3 RESULTADOS

Os resultados da simulação no PVSyst podem ser encontrados no Anexo 2. Foi escolhido um sistema com potência nominal igual a 5,0 kWp e através das coordenadas geográficas, foi obtido um valor HSP no plano inclinado igual à 5,87kWh/m<sup>2</sup>.dia e uma geração anual de 9000kWh. Para este sistema simulado não está definido qual o modelo e a marca dos módulos e inversor porque essas informações de saída não são fornecidas pelo software. A simulação é baseada em modelos padrões compostos por módulos de silício monocristalino, em um sistema instalado em telhado inclinado e parcialmente ventilados em sua parte posterior.

Os sistemas escolhidos para este estudo estão descritos no Anexo 1 e nelas estão contidas as informações referentes à cada sistema. Estão também seus respectivos índices de mérito calculados de acordo com o que foi descrito no capítulo. É apresentado na última coluna a diferença percentual da taxa de desempenho relativa ao sistema de referência. A irradiância H no plano do arranjo foi obtida através da base de dados do PVSyst para as diferentes inclinações dos sistemas:

- Inclinação de 5°: H = 2.041 kWh/m<sup>2</sup>;
- Inclinação de 10°: H = 2.088 kWh/m<sup>2</sup>;
- Inclinação de 15°: H = 2.123 kWh/m<sup>2</sup>.

Não foi possível obter uma variação muito grande de inclinações pois os sistemas avaliados foram instalados sobre telhados. As inclinações de 5° e 10° correspondem aos sistemas instalados sobre telhado metálico, que possuem uma inclinação menor do que os telhados coloniais. Na cidade de Ituiutaba, a inclinação desses tipos de telhado é por volta de 15°.

Para os sistemas com ângulo azimutal igual à 0°, surpreendentemente o sistema SFV17 apresentou a menor variação percentual na taxa de desempenho comparado com o sistema de referência. O sistema possui uma inclinação de 10° e, portanto, a radiação direta no plano do arranjo é menor. Esperava-se um valor menor para sua taxa de desempenho do que para os sistemas SFV03, SFV07, SFV09, SFV10 e SFV13, por exemplo, com inclinações iguais à 15°.

Destaca-se também os sistemas SFV04 e SFV07 que, apesar de possuírem orientação e inclinação distintas das ideais, apresentam valores para taxa de desempenho demasiadamente baixas.

O sistema SFV10, apesar de possuir uma configuração bem próxima do sistema de referência, apresenta uma diferença percentual na taxa de desempenho próxima ao sistema SFV02, que possui menor inclinação.

Dentre os sistemas com ângulo azimutal igual à  $-45^\circ$ , destaca-se o sistema SFV16, com inclinação igual à  $15^\circ$ , que possui a menor diferença percentual na taxa de desempenho entre todos os sistemas avaliados. É possível perceber também uma diferença considerável na taxa de desempenho do sistema SFV05, que possui uma inclinação maior do que os sistemas SFV01 e SFV14. Com exceção dos sistemas mencionados até aqui, todos os outros apresentaram resultados próximos do esperado. Os sistemas com inclinação igual a  $15^\circ$  e ângulo azimutal igual à  $-45^\circ$  e  $+45^\circ$  apresentam diferença percentual média na taxa de desempenho igual à 18,23%. Já os sistemas com inclinação igual a  $15^\circ$  e ângulo azimutal de  $-90^\circ$  e  $+90^\circ$  apresentam diferença percentual média na taxa de desempenho igual à 24,75%. A média de  $\Delta Pr\%$  para sistemas com mesma orientação e inclinações diferentes da ideal é apresentada a seguir:

- a) Ângulos azimutais de  $-45^\circ$  ( $\Delta\theta = -9^\circ$ ): 30,33%;
- b) Ângulos azimutais de  $-45^\circ$  ( $\Delta\theta = -4^\circ$ ): 19,22%;
- c) Ângulo azimutal de  $-90^\circ$  ( $\Delta\theta = -4^\circ$ ): 21,6%;
- d) Ângulo azimutal de  $+90^\circ$  ( $\Delta\theta = -4^\circ$ ): 22,62%;
- e) Ângulo azimutal de  $+90^\circ$  ( $\Delta\theta = -14^\circ$ ): 20,94%;
- f) Ângulo azimutal de  $0^\circ$  ( $\Delta\theta = -9^\circ$ ): 23,97%;
- g) Ângulo azimutal de  $0^\circ$  ( $\Delta\theta = -4^\circ$ ): 18,32%;

#### 4 CONCLUSÃO

Com exceção dos sistemas SFV17, SFV04, SFV07, SFV10, SFV16 e SFV05 os resultados obtidos estão próximos do esperado e coerente com o que diz a teoria. Estas divergências nos resultados podem ser em consequência a: falhas no sistema de monitoramento, o que é bastante comum acontecer; condições de sujidade sobre os painéis, uma vez que nem todos os sistemas passam por manutenções com a mesma frequência; a eventos isolados de falha no inversor; tempo de operação dos sistemas. Para se determinar a exata causa dessas diferenças no desempenho dos sistemas, investigações mais detalhadas seriam necessárias.

Quanto à variação do desempenho dos sistemas com diferentes orientações, foi possível observar que quanto maior a variação do azimute do sistema relativo ao norte geográfico maior será a perda na geração. Essa relação faz bastante sentido uma vez que

quanto maior for essa variação azimutal, menor será a quantidade de radiação global captada pelo arranjo fotovoltaico.

Com relação à variação do ângulo de inclinação notou-se em dois casos que quanto menor a inclinação, maiores serão as perdas. Entretanto, notou-se que em um dos casos, menor inclinação resultou em maior eficiência. Cabe aqui uma investigação mais profunda sobre o caso, pois quanto mais próximo a uma posição perpendicular relativa aos raios solares estiver o plano dos módulos, maior será a radiação direta captada. Entretanto, quanto mais próxima ao plano horizontal os módulos estiverem, maior será a radiação global captada. Fica, pois, nesta análise, impossível concluir qual destas duas relações exerce influência mais severa na eficiência do gerador. A partir destes resultados, fica evidente o quanto a orientação e inclinação dos módulos afeta a eficiência dos geradores fotovoltaicos. Os sistemas analisados foram instalados sob as mesmas condições climáticas, ou seja, impostas às mesmas variâncias de temperatura e irradiação solar, divergindo uns dos outros apenas pelas condições de instalações. Variações do ângulo azimutal resultaram em perdas de até 23,87% na geração anual. São valores ainda maiores do que os valores considerados na Tabela 4 para o dimensionamento. Apesar da geração mensal ser suficiente para suprir a demanda de consumo, é interessante revisar os valores de perdas relativas à orientação consideradas para o dimensionamento. Perdas devido a inclinações diferentes da ideal alcançaram valores de até 23,97%. Ainda que a relação entre variações da inclinação e eficiência não tenham ficado claras neste estudo, fica clara a necessidade de se aplicar modelos de correções precisos e adequados para o correto dimensionamento dos sistemas.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. P. Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2012.

AMATYA, R. The Future of Solar Energy: An Interdisciplinary MIT Study. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, p. 276. 2015. (ISBN).

ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasil: . Abril 2012.

ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687, 24 de dezembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Brasil: . 2015.

ARAÚJO, A. J. N.; RANK, I. N.; BUENO, A. T. B. Análise dos fatores de perdas nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

ARVIZU, D. E. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge University Press. Nova York. 2012. (ISBN).

BELUSSO, A.; CAINELLI, G. P. Análise do espectro de radiação solar e sua importância no correto dimensionamento de tecnologias para conversão fotovoltaica de energia. [S.l.]: 15º Congresso Nacional de Iniciação Científica. 2001. p. 11.

BENEDITO, R. S. Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório. Dissertação (Mestrado em Energia). São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C. Uma aula sobre o efeito fotoelétrico no desenvolvimento de competências e habilidades. Física na Escola, v. 3, n. 1, p. 24- 29, 2002.

COSTA, H. J. S. Avaliação do fator de dimensionamento do inversor em sistemas fotovoltaicos conectados a rede. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará - Centro de Tecnologia, 2010.

DGS, G. S. E. S. Planning and Installing Photovoltaic Systems. [S.l.]: [s.n.], 2013.

DONOVAN, E. L.; FLORSCHUETZ, L. W. Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration. Solar Energy, v. 19, p. 255-262, 1977.

DUBEY, S.; SARVAIYA, J. N.; SESHADRI, B. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World - A Review. Energy Procedia, Singapura, v. 33, p. 311-321, Março 2013.

ENERGIA Fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projeto e instalações. [S.l.]: Portal Energia.

ENERGIA solar fotovoltaica: origem e importância para os dias atuais. EBES. Disponível em: <<http://ebes.com.br/energia-solar-fotovoltaica-origem-e-importancia-para-os-dias-atuais/>>. Acesso em: 03 Dezembro 2020.

FUNARI, F. L.; TARIFA, J. R. Sunshine, global radiation and net radiation in Brazil. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, v. 38, p. 49-83, 2017.

GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables. Progress in photovoltaics: research and applications, Sydney, 31 Maio 2019. 1-11.

GREEN, M. et al. Solar cell efficiency tables. Progress in photovoltaic: research and applicatons, Sydney, 2020. 1-13.

IEA, I. E. A. Energy Solar Perspectives. França: [s.n.], 2011.

KALOGIROU, S. S. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. 2<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Academic Press, 2013.

KLEIN, S. A. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. Solar Energy, v. 19, p. 325-329, 1977.

KRESCH, D. BBC News Brasil. BBC News Brasil. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-41118402>>. Acesso em: 18 Fevereiro 2021.

LIU, B. Y. H.; RICHARD, J. C. The long-term average performance of flat-plane solar-energy collectors. Solar Energy, v. 7, p. 53-74, 1963.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. Revista Virtual de Química, Niterói, v. 7, n. 1, p. 126 - 143, Outubro 2014.

MARKVART, T.; CASTAÑER, L. Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications. Oxford: Elsevier, 2003.

NAKANO, A. Simulação de desempenho energético de tecnologias fotovoltaicas em fachadas de edifício no município de São Paulo. São Paulo : Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (Mestrado), 2017. p. 143.

NÓBREGA, B. S. et al. Desempenho de um sistema solar fotovoltaico com diferentes inclinações e orientações azimutais em cidades da Paraíba. Revista Principia, João Pessoa, v. 43, p. 175-188, 2018.

NORDMANN, T.; CLAVADETSHER, L. Understanding temperature effects on PV system performance. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Osaka: [s.n.]. 2003. p. 2243-2246.

O que é Custo de Disponibilidade e por que ele impede que a conta de luz seja zerada. 3E UNICAMP, 2020. Disponível em: <<https://3eunicamp.com/o-que-e-custo-de>>

disponibilidade-e-por-que-ele-impede-que-a-conta-de-luz-seja-zerada/#:~:text=Tamb%C3%A9m%20chamado%20de%20Tarifa%20ou,haja%20consumo%2C%20um%20valor%20mensal.>. Acesso em: 1 Março 2021.

OLIVEIRA, S. D.; TIEPOLO,. Análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados a rede em função da temperatura média no estado do Paraná. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado: [s.n.]. 2018. p. 2.

PEREIRA, E. B. et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2<sup>a</sup>. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014.

POTENCIAL Solar - SunData v3.0. CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&#sundata>>. Acesso em: 25 Fevereiro 2021.

SHARMA, V.; CHANDEL,. Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Hamirpur, v. 27, p. 753-767, Novembro 2013.

SISTEMAS de energia solar fotovoltaica e seus componentes. NeoSolar. Disponível em:<<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>>. Acesso em: 24 Fevereiro 2021.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. Renewable Energy, Brighton, v. 33, n. 1, p. 23-29, 2009. ISSN 0960-1481.

SOUZA, R. Os sistemas de energia solar fotovoltaica: livro digital de introdução aos sistemas solares. 1<sup>a</sup>. ed. Ribeirão Preto: BlueSol, v. 1.