

# Uma nova metodologia para o dimensionamento de sistemas off-grid com armazenamento

A new methodology for sizing off-grid systems with storage

**Rhenan Fellipe de Souza Melo**

rasm@discente.ifpe.edu.br

**Herick Talles Queiroz Lemos**

herick.lemos@pesqueira.ifpe.edu.br

---

## RESUMO

Na contramão da problemática ambiental, o consumo global de energia elétrica está cada vez maior, exigindo dos setores de fornecimento transições energéticas para fontes de energia mais eficientes e menos poluentes. No Brasil, a principal fonte de geração de energia elétrica é a hidráulica, mas com o atual desenvolvimento das fontes alternativas e as crises hídricas, fontes como a solar fotovoltaica têm passado por crescimento. O Brasil é um país com alto potencial para o desenvolvimento da tecnologia da energia solar fotovoltaica. Dentro das aplicações da energia solar fotovoltaica, existem os sistemas off-grid com armazenamento, que dispensam a conexão com a rede elétrica convencional e usualmente são dimensionados a partir de metodologias simplificadas baseadas nas horas de sol pleno da região. Neste contexto, este trabalho propõe uma metodologia de projeto alternativa que busca considerar as particularidades do fluxo de potência das cargas de corrente contínua (CC) e de corrente alternada (CA), bem como o dimensionamento mais preciso do gerador a partir do método da insolação com correção da eficiência dos módulos para suas condições reais de temperatura e irradiação de operação. Ao final do trabalho, a metodologia de projeto proposta é demonstrada por meio de um estudo de caso aplicado a uma residência isolada localizada na cidade de Garanhuns e no estado de Pernambuco.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. Metodologias de projeto. Sistemas fotovoltaicos isolados com armazenamento.

## ABSTRACT

In contrast with the environmental problem, the global power of electrical energy is increasing, demanding energy transitions from the energy supply sectors toward more efficient and less polluting energy sources. In Brazil, the primary source of electricity generation is hydraulic, but with the current development of alternative sources and water crises, sources such as solar photovoltaics have experienced growth. Brazil is a country with a high potential for developing photovoltaic solar energy

technology. Within the applications of photovoltaic solar energy, there are isolated systems with storage, which do not need to be connected to the conventional electricity grid and are usually sized based on simplified methodologies based on the peak sun hours. In this context, this work proposes an alternative design methodology that seeks to consider the particularities of the power flow of direct current (DC) and alternating current (AC) loads, as well as a more precise sizing of the generator using the insolation method with module efficiency correction for their actual operating temperature and irradiation conditions. At the end of the work, the proposed project methodology is showed through a case study applied to an isolated residence in the city of Garanhuns in Pernambuco.

Keywords: Photovoltaic solar energy. Design methodologies. Off-grid photovoltaic systems with storage.

## **1 INTRODUÇÃO**

O modo de vida cotidiano moderno implica na necessidade do uso contínuo de energia elétrica, de tal forma, que se faz necessário o planejamento de um sistema elétrico capaz de atender as necessidades do ser humano tanto no desenvolvimento de atividades laborais quanto pessoais.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017), o consumo de energia elétrica no Brasil deve crescer 3,7% ao ano até 2026. A demanda dos consumidores no país passará de 516 terawatts-hora (TWh) em 2016 para 741 TWh em 2026. O segmento de consumo comercial deverá apresentar uma expansão no consumo de 4,4% ao ano.

Com essa projeção, é possível enfatizar a importância e a necessidade de um sistema elétrico preparado para atender de forma segura a população brasileira através de diferentes fontes de energia (GRIEBELER et al, 2016). Dessa forma, fontes alternativas de geração de energia ganham força, com destaque para a energia solar fotovoltaica.

A energia solar fotovoltaica faz uso do efeito fotovoltaico para converter a energia da radiação solar em energia elétrica. Isso se dá, por meio de um dispositivo conhecido como “célula fotovoltaica”, que são constituídas de um material semicondutor, principalmente o silício. Segundo Nascimento (2014), as células fotovoltaicas são feitas para manter o fluxo de elétrons num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela, fenômeno denominado efeito fotovoltaico. E, atualmente é uma maneira de se fazer o aproveitamento do efeito fotovoltaico, e é utilizado nos sistemas off-grids.

No Brasil, os primeiros sistemas fotovoltaicos foram os autônomos, isto é, que fazem uso de baterias. Esses sistemas foram instalados em locais onde não se tinha acesso ao sistema de distribuição de energia elétrica. E, foi graças a esses sistemas que locais remotos puderam ter acesso à energia elétrica. Apesar de a energia solar

possuir uma variabilidade de geração em razão da sua dependência com as condições meteorológicas locais, os índices de radiação incidentes no Brasil favorecem a utilização desse tipo de energia (RÜTHER *et al.*, 2017).

O sistema off-grid é bastante utilizado em áreas isoladas, sem acesso à rede elétrica convencional, em sua maioria utiliza um sistema de armazenamento de energia para garantir o fornecimento de energia elétrica em períodos sem sol. (VILLALVA e GAZOLI, 2012). O sistema off-grid com armazenamento geralmente é utilizado em estações meteorológicas, sinalização rodoviária, ferroviária e marítima.

Usualmente os sistemas off-grid são dimensionados usando uma metodologia simplificada baseada no método das horas de sol pleno para o mês crítico (aquele de menor irradiação). É um exemplo de aplicação dessa metodologia o trabalho de (RIBEIRO, GIANKARLO FIALHO., 2020). Apesar de sua simplicidade, essa metodologia não considera as particularidades do fluxo de potência das cargas de corrente contínua (CC) e de corrente alternada (CA), tão pouco dimensiona o gerador prevendo um período específico para recarga do banco de baterias.

Nesse contexto, a proposta deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos off-grids com armazenamento que considere as lacunas citadas na metodologia simplificada. Além disso, para aumento na precisão dos resultados, será considerado na metodologia proposta, o método da insolação com correção mensal da eficiência dos módulos devido a variação da temperatura e irradiação para as condições de projeto.

## **2 SISTEMAS OFF-GRID COM ARMAZENAMENTO**

Esta seção apresenta uma breve conceituação e explanação acerca das características operacionais e especificações dos principais componentes de um sistema off-grid com armazenamento.

### **2.1 Características gerais**

Os sistemas off-grids são aqueles que operam de forma não conectada à rede elétrica de uma fornecedora de energia elétrica. Esses sistemas podem ser classificados em duas modalidades: com armazenamento e sem armazenamento. Os sistemas com armazenamento tipicamente dispõem de um banco de baterias para o armazenamento da energia elétrica excedente produzida pelo sistema e sua utilização em momento em que não ocorre geração de energia. São comumente utilizados em regiões isoladas ou de difícil acesso onde não há acesso à rede elétrica.

Já os sistemas off-grid sem armazenamento são aqueles em que a energia elétrica é consumida ao mesmo tempo que é gerada. Uma aplicação usual dessa configuração são sistemas de bombeamento d'água, os quais utilizam de geradores fotovoltaicos para bombear água para reservatório ou irrigação.

## **2.2 Principais componentes**

Em um sistema isolado fotovoltaico com armazenamento é indispensável haver uma autonomia para abastecer as demandas do usuário. Para produção e armazenamento isso é essencial a utilização de alguns componentes em conjunto. Os principais componentes são: módulos fotovoltaicos, controladores de carga, inversores de frequência e baterias estacionárias.

### **2.2.1 Módulos fotovoltaicos**

Os módulos fotovoltaicos são os principais componentes de um sistema fotovoltaico, eles são a base para a geração de energia, sendo responsáveis pela transformação de irradiação solar em energia elétrica. Os módulos são formados por um conjunto de células fotovoltaicas associadas em série e/ou paralelo, dependendo das tensões e/ou correntes de projeto.

A quantidade de módulos conectados em série irá determinar a tensão de operação do sistema em CC, sendo a corrente definida pela conexão em paralelo de módulos individuais ou de conjuntos de módulos conectados em série chamados de série fotovoltaica. A potência instalada, normalmente especificada em CC, é dada pela soma da potência nominal dos módulos individuais.

O conjunto destes módulos é chamado de gerador fotovoltaico e constituem a primeira parte do sistema, ou seja, são os responsáveis pelo processo de captação da irradiação solar e a sua transformação em energia elétrica (PEREIRA e OLIVEIRA,2011).

### **2.2.2 Controlador de carga**

O controlador de carga é um dispositivo utilizado em sistemas fotovoltaicos autônomos a fim de proteger a bateria de danos irreversíveis causados por cargas e descargas excessivas, o que também auxilia no prolongamento da vida útil das baterias (PINHO e GALDINO, 2014). Uma versão mais sofisticada permite que o controlador de carga desconecte o gerador quando as baterias se encontram completamente carregadas para prevenir uma sobrecarga.

### **2.2.3 Inversor de frequência**

O inversor de frequência é um dispositivo eletrônico que estabelece uma ligação entre o gerador fotovoltaico e as cargas CA. A sua principal tarefa consiste em converter o sinal elétrico CC do gerador fotovoltaico, por meio do acionamento

alternado de dispositivos de chaveamento, em um sinal elétrico CA (PINHO e GALDINO, 2014).

#### **2.2.4 Baterias estacionárias**

No sistema off-grid com armazenamento é necessário o uso de baterias estacionárias para fazer o armazenamento de parte da energia produzida. As baterias estacionárias são produzidas para suportar ciclos de descarga mais severos, dessa forma são os modelos mais indicados para sistemas off-grids com armazenamento. Convencionalmente, são mais utilizadas as baterias de chumbo-ácido e as baterias de íon-lítio.

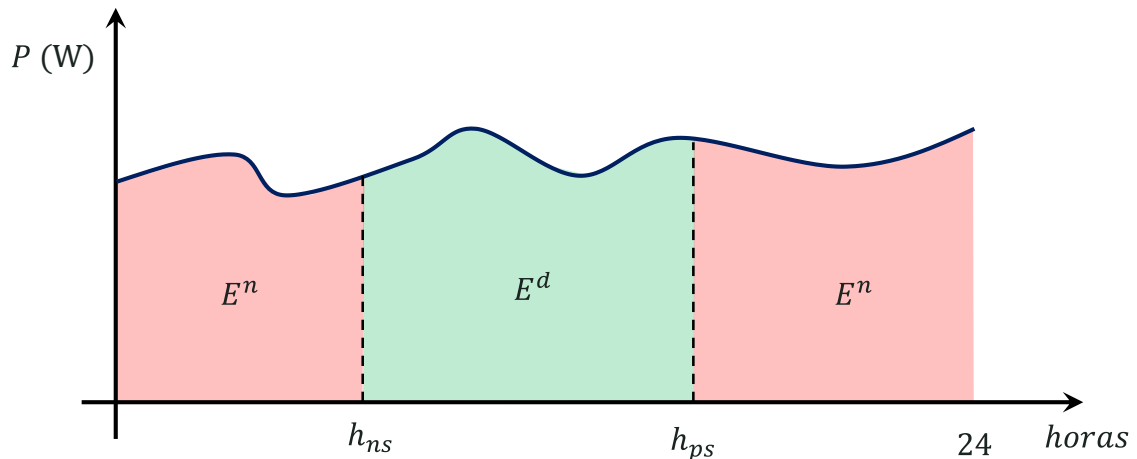
### **3 METODOLOGIA DE PROJETO PROPOSTA**

Esta seção apresenta a metodologia proposta para o projeto de sistemas off-grid com armazenamento. A metodologia é baseada na classificação horária dos fluxos de energia ao longo do dia para os regimes de operação normal e de autonomia, considerando a eficiência dos componentes envolvidos em cada regime e um número específico de dias para restabelecimento da energia de reserva armazenada no banco de baterias para o período de autonomia.

#### **3.1 Classificação e determinação do consumo**

A fim de considerar as particularidades dos fluxos de energia das cargas CC e CA ao longo de um dia, o consumo de energia será classificado como diurno e noturno. O consumo diurno será aquele verificado no período compreendido entre o nascer do sol e o pôr do sol, enquanto o consumo noturno será aquele verificado no período complementar para as 24 horas. A Figura 5 ilustra o critério de classificação horária do consumo. Na metodologia, recomenda-se que os horários de nascimento e pôr do sol sejam aqueles para os quais verifica-se, respectivamente, início da geração útil e fim da geração útil. Esses horários variam de acordo com a localização das cargas e considerações do projetista.

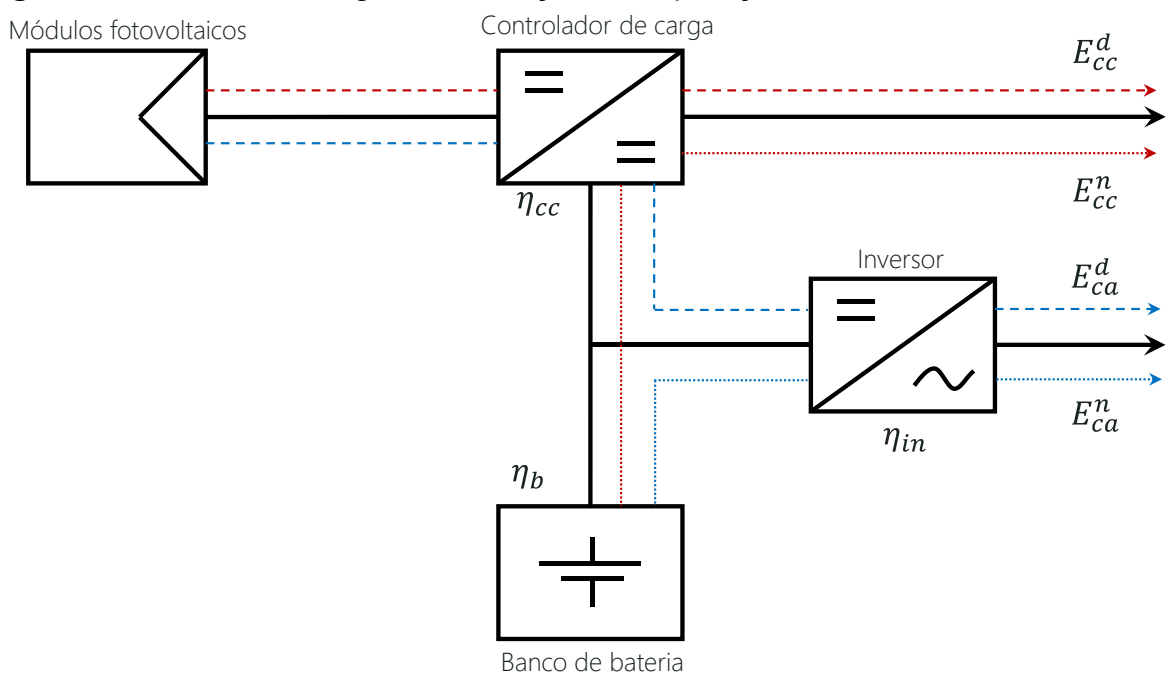
**Figura 5:** Esquematização do consumo diurno e noturno.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

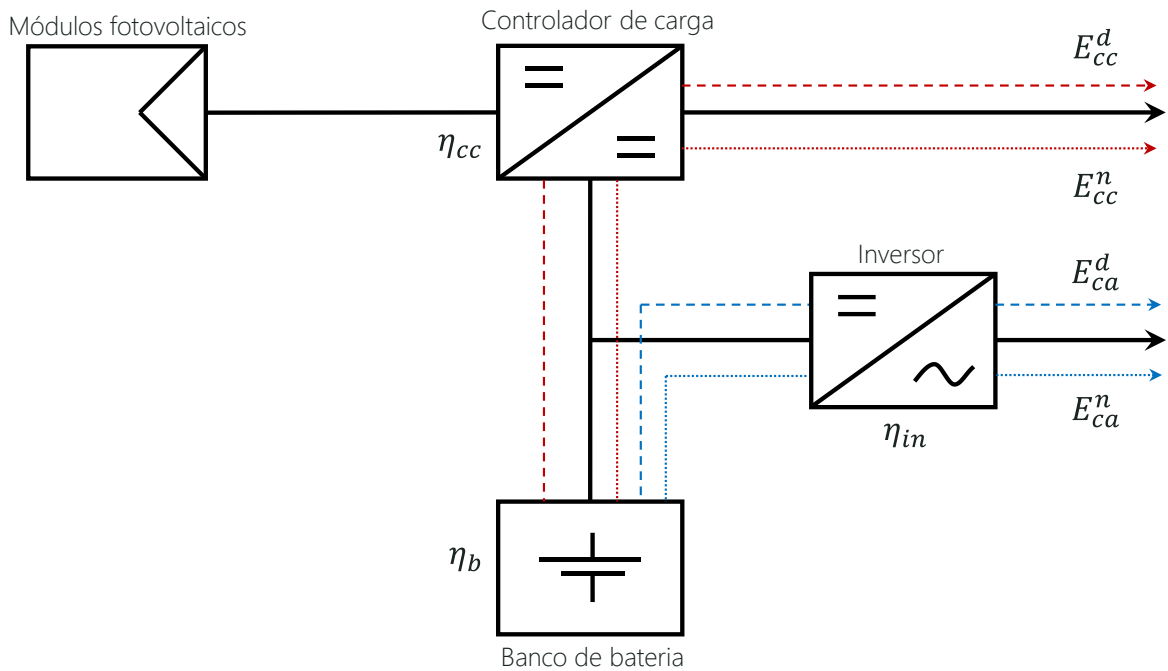
Além da diferenciação horária, o consumo também será classificado de acordo com o regime de operação em: consumo de operação normal e consumo de operação autônoma. No primeiro regime, assume-se que o sistema opera com condições normais de irradiação e os fluxos de energia das cargas CC e CA têm os sentidos indicados na Figura 6a. Já o período de autonomia, assume-se que a energia produzida pelo gerador é desprezível, de modo que a energia consumida pelas cargas é integralmente fornecida pelo sistema de armazenamento, circunstância que modifica o fluxo de carga das cargas CC e CA para os sentidos ilustrados na Figura 6b.

**Figura 6.a:** fluxos de energia em condições de operação normal.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

**Figura 6.b:** Fluxos de energia em condições de operação autônoma.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Nas seções a seguir serão detalhadas as grandezas das figuras e os métodos de determinação da energia fornecida as cargas diurnas e noturnas para os regimes de operação normal e autônoma.

### 3.1.2 Cálculo da energia fornecida para o regime de operação normal

Para o dimensionamento do consumo fornecido às cargas no período diurno, serão assumidas que os fluxos de energia das cargas CC e CA têm os sentidos definidos nas Figura 6a. Verifica-se que a energia fornecida para as cargas CC,  $E_{cc}^{d'}$ , corresponderá à energia consumida por essas cargas,  $E_{cc}^d$ , dividida pela eficiência do controlador de carga,  $\eta_{cc}$ , no sentido gerador cargas CA conforme a Equação 01.

$$E_{cc}^{d'} = \frac{E_{cc}^d}{\eta_{cc}} \quad (1)$$

A energia fornecida para as cargas CA,  $E_{ca}^{d'}$ , por outro lado, conforme a Figura 6a, corresponde à energia consumida,  $E_{ca}^d$ , dividida pelas eficiências do controlador de carga e do inversor,  $\eta_{in}$ , conforme a Equação 02.

$$E_{ca}^{d'} = \frac{E_{ca}^d}{\eta_{cc}\eta_{in}} \quad (2)$$

A energia diurna total será, portanto, a soma das energias fornecidas às cargas CC e CA nesse período, conforme a Equação 03.

$$E^d = E_{cc}^{d'} + E_{ca}^{d'} \quad (3)$$

Para a determinação da energia fornecida no período noturno também será assumido que os fluxos de energia CC e CA têm os sentidos definidos na Figura 6b. Nesta figura, verifica-se que a energia noturna fornecida às cargas CC,  $E_{cc}^{n'}$ , corresponde à energia consumida CC,  $E_{cc}^n$ , dividida pela eficiência da bateria,  $\eta_b$ , conforme a Equação 04.

$$E_{cc}^{n'} = \frac{E_{cc}^n}{\eta_b} \quad (4)$$

Já a energia noturna fornecida para as cargas CA,  $E_{ca}^{n'}$ , conforme a Figura 6b, corresponderá à energia consumida pelas cargas CA,  $E_{ca}^n$ , dividida pelas eficiências do banco de baterias,  $\eta_b$ , e do inversor de frequência,  $\eta_{in}$ , conforme a Equação 5.

$$E_{ca}^{n'} = \frac{E_{ca}^n}{\eta_b \eta_{in}} \quad (5)$$

A energia total fornecida no período noturno será o somatório das energias fornecidas às cargas CC e CA neste período, conforme a Equação 06.

$$E^n = E_{cc}^{n'} + E_{ca}^{n'} \quad (6)$$

A energia total fornecida para a condição normal de operação,  $E^t$ , será, portanto, a soma das energias fornecidas no período diurno e noturno, conforme a Equação 07.

$$E^t = E^d + E^n \quad (7)$$

Na seção a seguir será descrita a metodologia proposta para o cálculo da energia total fornecida às cargas no período de operação autônoma.

### **3.1.3 Cálculo da energia fornecida para o regime de operação autônoma**

Nas condições de operação autônoma, toda a energia fornecida às cargas, sejam elas do período diurno ou noturno, será fornecida pelo banco de baterias. Nestas condições, haverá alteração no sentido do fluxo da energia fornecida às cargas do período diurno, conforme ilustrado na Figura 6b.

Conforme os novos sentidos assumidos, a energia fornecida à carga CC diurna,  $E_{cc}^{d*}$ , corresponderá à energia consumida neste período dividida pela eficiência do banco de baterias, conforme a Equação 08.

$$E_{cc}^{d*} = \frac{E_{cc}^d}{\eta_b} \quad (8)$$



Já a energia fornecida à carga CA diurna,  $E_{ca}^{d*}$ , corresponderá à energia consumida neste período dividida pelas eficiências do banco de baterias e do inversor de frequência, conforme a Equação 09.

$$E_{ca}^{d*} = \frac{E_{ca}^d}{\eta_b \eta_{in}} \quad (9)$$

A energia total fornecidas às cargas diurnas no regime de autonomia será, portanto, a soma das energias fornecidas neste período às cargas CC e CA, conforme a Equação 10.

$$E^{d*} = E_{cc}^{d*} + E_{ca}^{d*} \quad (10)$$

Por fim, a energia total fornecida às cargas no regime de operação autônoma será a soma da energia fornecida às cargas diurnas e noturnas, multiplicada pelo número de dias de autonomia do sistema,  $n_a$ , conforme a Equação 11.

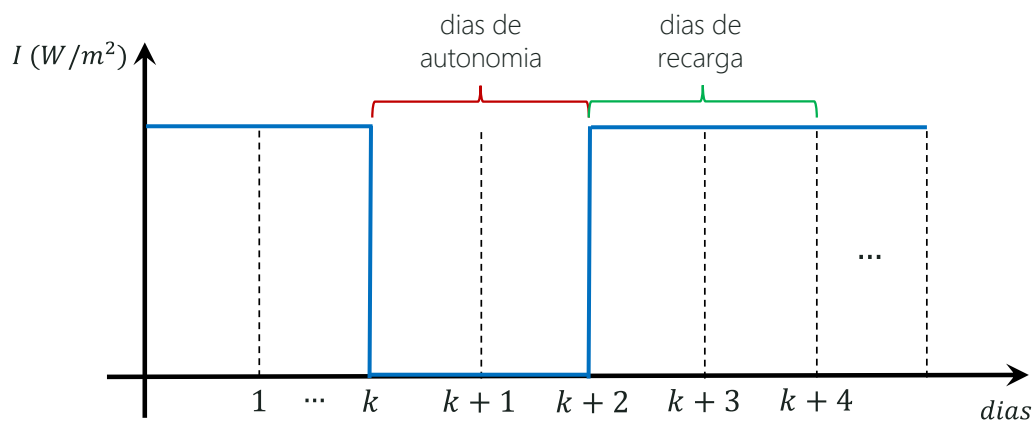
$$E^a = (E^{d*} + E^n)n_a \quad (11)$$

Na seção a seguir será apresentada a metodologia proposta para o dimensionamento do banco de baterias.

### 3.2 Dimensionamento do banco de baterias

A metodologia de dimensionamento proposta para o banco de baterias é baseada na seguinte premissa: a capacidade de armazenamento do banco deverá suprir o consumo das cargas do período noturno no regime de operação normal e, a qualquer tempo, o consumo total diário para um regime de operação autônoma de  $n_a$  dias. Além disso, imediatamente após um regime de operação autônoma, o gerador fotovoltaico terá  $n_r$  dias de operação em regime normal para repor a energia consumida no regime de operação autônoma. A Figura 7 ilustra as premissas assumidas.

**Figura 7:** Dias de autonomia e dias de recarga.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A partir das premissas estabelecidas, verifica-se que a energia armazenada no banco de baterias deverá corresponder à energia fornecida às cargas no período noturno, acrescida da energia total fornecida às cargas no regime de operação autônomo, conforme a Equação 12.

$$E_{bb} = E^n + (E^n + E^{d*})n_a \quad (12)$$

Para determinação da capacidade da bateria em Ampères-hora, recomenda-se o uso da Equação 13 (MOURA, 2019). Esta equação considera um fator para compensação da redução da eficiência do banco – denominado fator de envelhecimento,  $f_e$  – e o parâmetro de profundidade de descarga,  $p_d$ , o qual define a energia real fornecida pelo banco como um percentual máximo de 20 a 30% da capacidade total do banco, a fim prolongar sua vida útil. Na Equação 18, o parâmetro  $V_{bb}$  corresponde a tensão escolhida para o banco de baterias, conforme os critérios do projetista.

$$Ah_{bb} = \frac{E_{bb} f_e}{V_{bb} p_d} \quad (13)$$

Sabendo-se a capacidade total do banco e a capacidade do modelo de bateria selecionada para o projeto,  $Ah_b$ , pode-se determinar no número de fileiras de baterias em paralelo que compõe o arranjo do banco por meio da Equação 14.

$$N_{fb} = \frac{Ah_{bb}}{Ah_b} \quad (14)$$

Outrossim, conhecendo-se a tensão nominal da bateria utilizada no banco – usualmente 12 V para as baterias de chumbo-ácido – pode-se determinar o número de baterias em série necessárias em cada fileira do arranjo do banco por meio da Equação 15.

$$N_{bs} = \frac{V_{bb}}{V_b} \quad (15)$$

Por fim, o número total de baterias necessárias para o banco será o produto de  $N_{fb}$  por  $N_{bs}$ , conforme a Equação 16.

$$N_b = N_{bs}N_{fb} \quad (16)$$

Tendo em vista que o ciclo de utilização do banco de bateria está compreendido entre o horário de pôr-do-sol e nascer do sol, recomenda-se que esse período seja utilizado como taxa de descarga da bateria de referência 12MS234 para verificação da capacidade real do banco. Tipicamente esse período encontra-se entre 13 e 16 horas, podendo ser considerado, à critério do projetista, a capacidade das baterias na taxa C10 ou C20.

Na seção a seguir será apresentada a metodologia proposta para o dimensionamento do gerador fotovoltaico.

### 3.2 Dimensionamento do gerador fotovoltaico

A metodologia proposta para o dimensionamento do gerador fotovoltaico baseia-se na seguinte premissa: o gerador deverá fornecer a energia consumida no período diurno,  $E^d$ , e repor a energia fornecida no período noturno pelo banco de baterias,  $E^n$ , acrescida de uma parcela da energia fornecida às cargas no regime de operação autônoma,  $E^a$ . A parcela de energia repostada corresponderá à energia fornecida às cargas no regime de operação autônoma dividida pelo número de dias de recarga,  $n_r$ . A partir da premissa estabelecida, tem-se que a energia a ser fornecida pelo gerador será dada pela Equação 17.

$$E_g = E^d + E^n + E^a \frac{1}{n_r} \quad (17)$$

Alternativamente, substituindo-se a Equação 11 na Equação 17, obtém-se:

$$E_g = E^d + E^n + (E^n + E^{d*}) \frac{n_a}{n_r} \quad (18)$$

A energia diária a ser fornecida pelo gerador fotovoltaico,  $E_g$ , deverá, no mínimo, coincidir com a energia média diária gerada por ele. A média diária de geração,  $E_{gd}$ , poderá ser estimada a partir da Equação 19.

$$E_{gd} = \frac{1}{365} A_m N_m \sum_{i=1}^{12} I_{(i)} \eta_{m(i)} n_{d(i)} \quad (19)$$

Na Equação 19:

- $A_m$  é a área do módulo fotovoltaico, em  $m^2$ ;
- $N_m$  é o número de módulos utilizados no gerador;
- $I_{(i)}$  é a irradiação média em  $Wh/m^2/dia$  para o mês  $i$ ;
- $\eta_{m(i)}$  é a eficiência média do módulo corrigida para o mês  $i$ ;
- $n_{d(i)}$  é o número de dias do mês  $i$ .

A eficiência do módulo pode ser corrigida em cada mês por meio da Equação 20. Nesta equação,  $T_c$ ,  $\eta_m^{STC}$  e  $\gamma$  correspondem, respectivamente, à temperatura da célula nas condições reais de operação, à eficiência do módulo nas condições de teste padrão – ou STC, do inglês Standard Test Conditions – e ao coeficiente de temperatura do módulo para a potência.

$$\eta_{m(i)} = \eta_m^{STC} [1 + \gamma(T_c - 25)] \quad (20)$$

Os parâmetros  $\eta_m^{STC}$  e  $\alpha$  podem ser obtidos por meio de consulta à folha de dados do módulo escolhido para o projeto. Já a temperatura da célula nas condições reais de operação pode ser estimada por meio da Equação 21.

$$T_c = (T_{amb} + KG) \quad (21)$$

Na Equação 21,  $T_{amb}$  é a temperatura ambiente do local de instalação,  $G$  é a irradiância de projeto e  $K$  é uma constante que reflete o ganho de temperatura da célula mediante variações na irradiância incidente. A constante  $K$  pode se estimada por meio da Equação 22, em que  $T_c^{NOCT}$  é a temperatura da célula nas condições de operação nominal – ou NOCT, do inglês Nominal Operation Cell Temperature –, a qual pode ser consultada na folha de dados do módulo utilizado no projeto.

$$K = \frac{T_c^{NOCT} - 20}{800} \quad (22)$$

Igualando-se a Equação 18 com a Equação 19, pode-se, portanto, determinar no número médio de módulos necessários para geração da energia diária  $E_{gd}$ , conforme a Equação 23.

$$N_m = \frac{365E_{gd}}{A_m \sum_{i=1}^{12} I_{(i)} \eta_{m(i)} n_{d(i)}} \quad (23)$$

A critério do projetista, pode-se introduzir um fator maior que a unidade no numerador da Equação 23 para compensar perdas não consideradas no dimensionamento, tais como possíveis perdas por sombreamento e acúmulo de sujidades nos módulos. Sugere-se valores entre 1,05 e 1,2.

Na seção a seguir será apresentada a metodologia proposta para o dimensionamento do inversor de frequência.

### 3.3 Dimensionamento do inversor de frequência

A metodologia proposta para o dimensionamento do inversor de frequência baseia-se na seguinte premissa: o inversor será conectado diretamente no banco de baterias, possibilitando o uso da potência de surto do inversor para o suprir eventuais picos na demanda. A alternativa à opção recomendada consiste na conexão do inversor ao controlador de carga, configuração que limita à corrente de entrada do inversor ao valor máximo de saída do controlador de carga. Isto posto, para a configuração adotada, sugere-se o atendimento aos seguintes critérios:

- i. A tensão entrada do inversor deve ser superior ou igual à tensão do banco de baterias;
- ii. A potência nominal do inversor,  $P_n$ , deve ser superior ou igual à demanda média das cargas,  $D_{méd}$ , multiplicada por um fator de serviço de 1,2, conforme

a Equação 24. Tal fator é introduzido para evitar sobrecarga do inversor quanto do aumento na demandada em um fator de até 20%.

$$P_n \geq 1,2D_{méd} \quad (24)$$

- iii. A potência de surto do inversor deve ser superior ou igual à demanda de pico das cargas.
- iv. Selecionar inversores com forma de onda senoidal pura quando, dentre as cargas CA, forem alimentados equipamentos de informática, motores, bombas e similares ou outros equipamentos eletrônicos sensíveis. Do contrário, para redução de custos, pode-se optar pelo uso de inversores com forma de onda senoidal modificada.

Na próxima seção será apresentado os critérios mínimos recomendados para o dimensionamento do controlador de cargas.

### 3.5 Dimensionamento do controlador de carga

Para o dimensionamento do controlador de carga, recomenda-se a adoção dos seguintes critérios mínimos:

- i. A tensão máxima de entrada do controlador deve ser superior à tensão de circuito aberto do arranjo fotovoltaico.
- ii. A tensão de máxima potência do arranjo deve encontrar-se na faixa de operação do MPPT do controlador de carga.
- iii. A potência máxima de entrada do controlador,  $P_{cc}^{máx}$ , para a tensão escolhida para banco de baterias, deve ser superior à potência do arranjo fotovoltaico,  $P_g^{STC}$ , multiplicada por um fator de 1,2, conforme a Equação 25. O fator adicionado é recomendado para evitar a sobrecarga do controlador quando o gerador injetar uma potência superior àquela especificada nas condições STC.

$$P_{cc}^{máx} \geq 1,2P_g^{STC} \quad (25)$$

Quando o fabricante do controlador não declarar em sua folha de dados a potência máxima de entrada permitida, pode-se aplicar, em alternativa ao critério iii, o seguinte critério apresentado na Equação 26.

$$I_{cc}^{máx} \geq 1,2 \frac{P_g^{STC}}{V_{bb}} \quad (26)$$

O critério da Equação 26 tem como premissa o fato de o controlador processar toda a potência injetada pelo gerador e distribuí-la em correntes em suas saídas, as quais são determinadas pela tensão do banco de baterias.

Na seção a seguir será apresentada uma breve demonstração da metodologia proposta a partir de um estudo de caso realizado na cidade de Garanhuns/PE.

#### 4. ESTUDO DE CASO

A fim de demonstrar a aplicação da metodologia proposta, esta seção apresenta um estudo de caso aplicado em uma pequena residência localizada no interior da cidade de Garanhuns-PE. A residência escolhida dispõe de telhado com azimute de superfície de 6 graus e inclinação de 15 graus. A localidade do estudo encontra-se exposta aos níveis de irradiação e temperatura média apresentados no Quadro 1.

**Quadro 1:** Irradiação média diária na localidade da residência.

Mês	Irradiação (Wh/m <sup>2</sup> /dia)	Temperatura máxima (°C)
Janeiro	6000	34,8
Fevereiro	5706	34,8
Março	5817	33,6
Abril	5130	33,9
Maio	4272	32,3
Junho	3812	29,1
Julho	3942	29,5
Agosto	4587	30,1
Setembro	5448	35,3
Outubro	5763	34,7
Novembro	6319	34,7
Dezembro	6226	34,5

**Fonte:** IFPE - Cálculo de Radiação, 2022 e CLIMATE-DATA, 2022.

A residência estudada conta com cargas alimentadas em CA e em CC. O Quadro 2 apresenta um detalhamento das cargas utilizadas com seus respectivos períodos de funcionamento.

**Quadro 2:** Cargas da unidade consumidora e seu período de funcionamento.

Carga	Quantidade	Potência total (W)	Horário de funcionamento
Geladeira CC - 24V	1	72	00:00h – 24:00h
Bomba d'água CC - 24V	1	22	09:00h – 09:30h
Lâmpada LED CA – 220 V	3	18	18:00h – 21:00h
TV 32" CA – 220 V	1	32	18:00h – 21:00h
Liquidificador CA – 220 V	1	250	11:00h – 11:03h
Carregador celular CA – 220 V	1	5	15:00h – 16:00h
Receptor para TV CA – 220 V	1	10	18:00h – 21:00h

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

O Quadro 3 apresenta parâmetros de projeto adotados no estudo de caso.

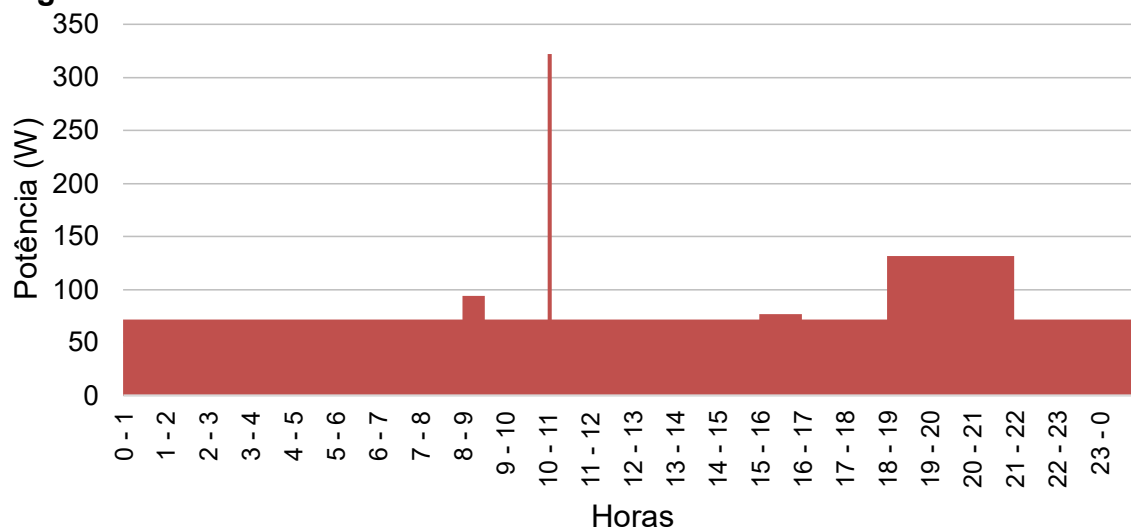
**Quadro 3:** Parâmetros de projeto.

Horário de nascimento do sol	8 h
Horário de pôr-do-sol	17 h
Número de dias operação autônoma	1 dia
Número de dias de recarga do banco de baterias	5 dias
Tensão do banco de baterias	24 V
Eficiência coulombiana da bateria	0,8
Fator de envelhecimento das baterias	1,25
Eficiência do inversor	0,8
Eficiência do controlador de carga	0,97

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

#### 4.1 Determinação dos consumos de energia

A partir dos dados de potência e do período de funcionamento das cargas apresentados no Quadro 2, elaborou-se a curva de demanda apresentada na Figura 8.

**Figura 8:** Curva de demanda da unidade consumidora.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2022.

Considerando os horários definidos para  $h_{ns}$  e  $h_{ps}$  e as eficiências dos equipamentos informadas no Quadro 3, foram obtidos os resultados apresentados no Quadro 4 para os consumos diurno, noturno e diário total no regime de operação normal, por meio das Equações 3, 6 e 7 respectivamente.

**Quadro 4:** Energia diurna e noturna fornecida em condições normais.

Tipo de carga	Energia fornecida (Wh)	
	Diurna	Noturna
CC	659,9	1333,3
CA	21,0	277,8
Total (Wh)	680,9	1611,1
<b>Total diário (Wh)</b>	2292	

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Já para o regime de operação autônoma de 1 dia, obteve-se, por meio das Equações 10 e 11, os valores 840,6 Wh e 2.451,7 Wh para a energia fornecida no período diurno e total do período respectivamente.

#### 4.2 Dimensionamento banco de baterias

Para composição do sistema de armazenamento, serão utilizadas baterias solares do fabricante Moura, modelo 12MS234 e capacidade de 220Ah em C20. Considerando os parâmetros de projeto apresentados no Quadro 3 e os resultados obtidos para as energias fornecidas nos regimes de operação normal e autônoma, foi dimensionado um banco de baterias com especificações apresentadas no Quadro 5, a partir das Equações 13 a 16.

**Quadro 5:** Energia diurna fornecida em condições normais.

Energia utilizada do banco de baterias	4.062,8 Wh
Capacidade calculada para o banco de baterias	870,8 Ah
Número de fileiras de baterias em paralelo calculado	3,96
Número de baterias em série por fileira	2
Número total de baterias	7,92

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Ajustando-se o número de fileiras de baterias em paralelo para 4, obtém-se um número total de 8 para baterias para o banco, com uma capacidade total de 880 Ah em C20.

#### 4.3 Dimensionamento do gerador fotovoltaico

Para compor o gerador serão utilizados módulos fotovoltaicos do fabricante Resun modelo RS6S-340P de 340 Wp. As especificações técnicas do módulo escolhido estão apresentadas no Quadro 6.



**Quadro 6:** Especificações técnicas do módulo utilizado.

Potência de pico	340 W
Tensão de máxima potência	38,3 V
Tensão de circuito aberto	46,8 V
Corrente de máxima potência	8,88 A
Eficiência	18,55 %
Coeficiente de temperatura para a potência	-0,39 %/°C
Temperatura nominal da célula	45 °C
Área	2,1 m <sup>2</sup>
Tecnologia de célula	silício policristalino

**Fonte:** Catálogo Resun solar RS6S- P, (2021).

A partir dos dados de temperatura da localidade, apresentadas nos Quadro 1, realizou-se a correção da eficiência média dos módulos a partir da Equação 20. Para o ajuste, considerou-se uma irradiação de projeto de 800 W/m<sup>2</sup>, que resultou na constante de temperatura para a irradiação,  $K$ , de 0,0338 °Cm<sup>2</sup>/W por meio da Equação 22. O Quadro 7 apresenta os valores obtidos para a temperatura da célula e a eficiência média corrigida a partir das Equações 20 e 21 respectivamente.

**Quadro 7:** Temperatura da célula e eficiência corrigida para as condições reais de operação.

Mês	Temperatura da célula	Eficiência do módulo
Janeiro	61,8°C	15,014%
Fevereiro	61,8°C	15,014%
Março	60,6°C	15,096%
Abril	60,9°C	15,076%
Maio	59,3°C	15,185%
Junho	56,1°C	15,404%
Julho	56,5°C	15,376%
Agosto	57,1°C	15,335%
Setembro	62,3°C	14,980%
Outubro	61,7°C	15,021%
Novembro	61,7°C	15,201%
Dezembro	61,5°C	15,035%

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Aplicando-se as Equações 23 e 24, assumindo 5 dias para o período de recarga do banco de baterias, verificou-se que o gerador deverá fornecer a energia diária de 2.782,3 Wh por meio de 2 módulos fotovoltaicos.

#### 4.4 Dimensionamento do controlador de carga e do inversor de frequência

Para o dimensionamento do controlador de carga, foram aplicados os critérios i a iii descritos na Seção 3.5, considerando uma associação em paralelo para os módulos fotovoltaicos. A partir desses critérios, verifica-se que o controlador de carga

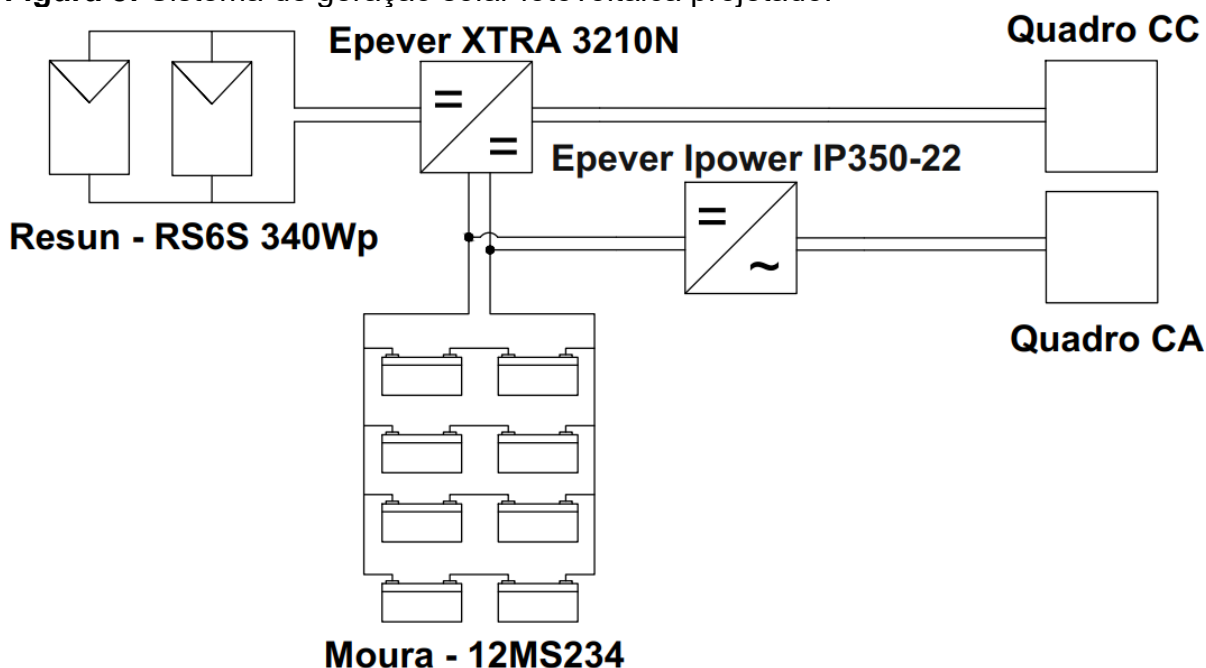
deve suportar uma tensão de entrada superior a 46,8 V e uma potência de geração superior a 816 W. Além disso, faixa de operação do MPPT do controlador deve ser compatível com a tensão de máxima potência de 38,3 V. Atendendo a esses requisitos, foi selecionado o controlador de carga XTRA 3210N de 30A fabricado pela Epever, que dispõe de capacidade para até 1.170 W em módulos fotovoltaicos e suporta até 100 V de tensão de entrada, com uma faixa de tensão de MPPT de 26 a 72 V (Catálogo Epever XTRA 3210N, 2021).

O inversor de frequência foi dimensionado a partir dos critérios i a iv descritos na Seção 3.3. Da análise da curva de demanda apresentada na Figura 8, verificou-se que a demanda média das cargas CA é 197,5 W, portanto, pela Equação 24, a potência do inversor de frequência deve ser superior ou igual a 237 W. Atendendo aos critérios citados, foi o inversor de onda senoidal pura Epever Ipower IP350-22 – 350W de 24V/220V, (Catálogo Epever Ipower series, 2021).

#### 4.5 Resumo do projeto

Para atender ao consumo diário de uma residência isolada com 409 W de carga instalada localizada no município de Garanhuns/PE, considerando a possibilidade de operação autônoma de 1 dia, faz-se necessário a implantação do sistema de geração off-grid apresentado na Figura 8, de acordo com a metodologia de projeto apresentada neste trabalho.

**Figura 8:** Sistema de geração solar fotovoltaica projetado.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos anos, a utilização de sistemas fotovoltaicos com armazenamento como meio de suprimento de eletricidade em pequenas residências familiares isoladas, bombeamento de água e iluminação pública tem se consolidado no mercado. Usualmente esses sistemas são projetados a partir de metodologias simplificadas baseadas no método das horas de sol pleno e que desprezam as particularidades do fluxo de potência das cargas CC e CA e não preveem um período para reposição da energia fornecida pelo banco de baterias quando em operação autônoma.

Nesse trabalho, foi proposta uma metodologia de dimensionamento alternativa baseada na classificação horária dos fluxos de energia ao longo do dia para os regimes de operação normal e autônoma, considerando a eficiência dos componentes envolvidos em cada regime e um número específico de dias para restabelecimento da energia de reserva armazenada no banco de baterias para o período de autonomia. Além disso, para aumento da precisão no dimensionamento do gerador, foi proposto a utilização do método da insolação com correção da eficiência dos módulos para suas condições reais de temperatura e irradiação de operação. A fim de elucidar sua aplicação, realizou-se uma demonstração da metodologia proposta em um estudo de caso com uma residência isolada localizada na cidade de Garanhuns/PE.

Como sugestão de trabalho futuros, propõe-se a pesquisa e inclusão dos efeitos dinâmicos de carga e descarga das baterias na metodologia de dimensionamento do banco. Além disso, sugere-se a realização de um estudo de validação da metodologia proposta a partir de modelos dinâmicos dos equipamentos do sistema em softwares de simulação comerciais.

## 6 REFERÊNCIAS

**CATÁLOGO ELSYS**, 2022. Conectar pessoas para transformar vidas. Disponível em: Ficha-técnica-SATMAX-5 - V3.pdf. Acesso em 30 Jun.2022.

**AF CATÁLOGO MOURA SOLAR**, 2019. Solar estacionária catálogos de produtos.

Disponível em:

<https://download.aldo.com.br/pdfprodutos/Produto68163IdArquivo25975.pdf>. Acesso em 30 Jun. 2022.

**CATÁLOGO MULTILASER**, 2022. Se sua vida pede, a Multilaser tem. Disponível em: [arquivos.multilaser.com.br/manual/TL001\\_TL003\\_Manual.pdf](http://arquivos.multilaser.com.br/manual/TL001_TL003_Manual.pdf). Acesso 30 Jun. 2022.

**IFPE**, 2022. Cálculo de Radiação. Disponível em: <http://www.radiacaosolar.com.br/>. Acesso em 01 Jun. 2022.

**CLIMATE-DATA**. 2022. Dados climáticos para cidades mundiais. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/pernambuco/garanhuns-4458/>. Acessado em: 01 Jun.2022.

**CATÁLOGO OSTER**.2022. O poder para criar tudo. Disponível em: Catálogo Oster ([ostercatalog.com](http://ostercatalog.com)). Acesso em 01 Jun. 2022.

**EPEVER SOLAR**. 2022. Equipamentos para energia solar. Disponível em: [IPower-Spannungswandler-EN.pdf](#) ([solarv.de](http://solarv.de)). Acesso em 30 Jun. 2022.

**EPE. PLANO DECEMAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2026**. Ministério De Minas e Energia. Empresa De Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2017.

**CATÁLOGO LORENZETTI**, 2022. Mais do que você imagina. Disponível em: [iluminacao.pdf](#) ([lorenzetti.com.br](http://lorenzetti.com.br)).Acesso em: 01 Jun. 2022.

GRIEBELER, Diane Ines, et al. **Análise Para Implantação De Sistema Fotovoltaico De Geração De Energia Em Uma Agroindústria De Santo Cristo/Rs**. Santa Maria/RS, agosto. 2016.

**Neosolar a**,2022. Vem pro Sol. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/controlador-carga-mppt-30a-12-24v-epever-extra-3210n.html>. Acesso em: 05 Abr. 2022.

**Neosolar b**,2022. Vem pro Sol. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/controlador-carga-mppt-20a-12-24v-epever-extra-2210n.html>. Acesso em: 05 Abr. 2022.

**Neosolar c**,2022. Vem pro Sol. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-340w-resun-rs6e-340p.html>. Acesso em: 05 Abr. 2022.

PEREIRA, F.; OLIVEIRA, M. **Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica**. Porto: Publindústria, 2011.

PINHO, J. T.; GALDINO M. A.; **Manual de Engenharia para Sistemas**

**Resun solar**,2022. Datasheet Resun solar RS6S-P. Disponível em: <[www.resunsolar.com/download](http://www.resunsolar.com/download)>. Acesso em 30 Jun. 2022.

RIBEIRO, Giancarlo Fialho. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico off-grid em um motorhome**. 2020. Monografia (Graduação em Engenharia da Computação) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2020.

RÜTHER, Ricardo et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia sola fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1. Ed. São Paulo: Érica, 2012.