

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

THIAGO DE ALMEIDA BAZIOTTI

**REAPROVEITAMENTO DE CÉLULAS 18650 ORIUNDAS DE BATERIAS DE
NOTEBOOK PARA APLICAÇÃO EM SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID
RESIDENCIAL: TESTE, ESTUDO DE CASO E VIABILIDADE ECONÔMICA**

POÇOS DE CALDAS /MG

2023

THIAGO DE ALMEIDA BAZIOTTI

**REAPROVEITAMENTO DE CÉLULAS 18650 ORIUNDAS DE BATERIAS DE
NOTEBOOK PARA APLICAÇÃO EM SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID
RESIDENCIAL: TESTE, ESTUDO DE CASO E VIABILIDADE ECONÔMICA**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente.

Orientador: Daniel Juliano Pamplona da Silva

POÇOS DE CALDAS /MG

2023

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Baziotti, Thiago de Almeida.

Reaproveitamento de células 18650 oriundas de baterias de notebook para aplicação em sistema fotovoltaico off-grid residencial: : teste, estudo de caso e viabilidade econômica / Thiago de Almeida Baziotti. - Poços de Caldas, MG, 2023.

50 f. -

Orientador(a): Daniel Juliano Pamplona da Silva.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) -
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2023.

Bibliografia.

1. Off-grid. 2. Células 18650. 3. Energia fotovoltaica. 4. Energia renovável. 5. Baterias de íon-lítio. I. da Silva, Daniel Juliano Pamplona, orient. II. Título.

THIAGO DE ALMEIDA BAZIOTTI

Reaproveitamento de células 18650 oriundas de baterias de notebook para aplicação em sistema fotovoltaico Off-Grid residencial: teste, estudo de caso e viabilidade econômica

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Linha de pesquisa: Recursos Hídricos e Meio Ambiente.

Aprovada em: 22 de agosto de 2023.

Prof. Dr. Daniel Juliano Pamplona da Silva
Presidente da Banca Examinadora
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Rodolfo Valentim da Costa Lima
Instituição: Universidade Federal de São Paulo

Prof. Dr. Rafael Brito de Moura
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Juliano Pamplona da Silva, Professor do Magistério Superior**, em 24/08/2023, às 22:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1065151** e o código CRC **41AD0848**.

Dedico este trabalho aos meus pais, Vanderlei e Rita, por todo esforço, dedicação, atenção e carinho empregados na minha formação como ser humano e o profissional que sou hoje.

À minha amada Laura, pelo apoio em momentos desafiadores e incentivo a sempre continuar tentando, com alegria no coração e leveza.

Aos meus avós, Zélia e José, pelo apoio e carinho de sempre.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me permitir concretizar este sonho.

Agradeço ao meu orientador, o qual foi extremamente cooperativo, acessível e solícito em cada instância deste trabalho, representando elemento de grande importância para a existência desta dissertação.

Aos meus patrões, Araújo e Isabel, os quais permitiram minha flexibilidade de horários para assistir as aulas e em momentos que necessitei me ausentar do expediente para dar enfoque a todos os processos relativos ao mestrado.

Aos meus amigos e colegas de turma, que contribuíram em cada passo desta jornada.

Agradeço à Universidade Federal de Alfenas por me proporcionar grande crescimento e aprendizado, além da realização desta etapa de minha vida.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Aspectos relacionados à preservação ambiental são pautados diariamente em diversos setores da sociedade e indústria. Diante da importância e da finitude dos recursos naturais, a busca por fontes alternativas de energia, tais como eólica e solar, torna-se um movimento emergente e de importância globalmente conhecida. Dentre elas, a energia fotovoltaica assume papel proeminente, em razão da abundância de sua fonte. O objeto de estudo desta dissertação é o dimensionamento de uma bateria para alimentar um sistema off-grid residencial, aliado aos seus principais aspectos construtivos. Para tal, foram levantados e descritos os componentes que caracterizam esse sistema, incluindo os tipos de baterias normalmente utilizados. Sob o ponto de vista técnico e ambiental, a bateria de íons de lítio tem grande importância, uma vez que muitos equipamentos eletrônicos funcionam com dispositivos desta natureza. Um destes aparelhos é o notebook, cuja bateria é composta por um conjunto de células 18650, as quais sofrem descarte com destino a empresas de lixo de eletrônicos. No entanto, grande parte delas oferece condições de reutilização, permitindo ser aplicadas em projetos que possam contribuir para a diminuição do descarte destes objetos, caracterizando um ponto de vantagem sob a ótica de preservação ambiental, unindo dois fatores de suma importância: um sistema fotovoltaico off-grid e reutilização de baterias de notebook.

Palavras-chave: Off-grid; Células 18650; Energia fotovoltaica; Energia renovável; Baterias de íon-lítio.

ABSTRACT

Aspects related to environmental preservation are discussed daily in different sectors of society and industry. Given the importance and limitation of natural resources, the search for alternative energy sources, such as wind and photovoltaic, becomes an emerging movement of globally known importance. Among them, photovoltaic energy plays a prominent role, due to the abundance of its source. The object of study of this dissertation is the design of a battery to power a residential off-grid system, combined with its main construction aspects. To this end, the components that characterize this system were surveyed and described, including the types of batteries normally used. From a technical and environmental point of view, the lithium-ion battery has great importance, since many electronic equipments work with devices of this nature. One of these devices is the laptop, whose battery is made up of a set of 18650 cells, which are disposed of by electronic waste companies. However, most of them offer conditions for reuse, allowing them to be applied in projects that can contribute to reducing the disposal of these objects, featuring an advantage point from the perspective of environmental preservation, combining two extremely important factors: an off-grid photovoltaic system -grid and reuse of laptop batteries.

Keywords: Off-grid; 18650 cells; Photovoltaic energy; Renewable energy; Lithium-ion batteries.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Bateria de chumbo-ácido	37
Figura 2- Dimensões da célula 18650	38
Figura 3- Especificações da célula NCR 18650	39
Figura 4- Características de carga	39
Figura 5 - Características de descarga.....	40
Figura 6 - Tabela comparativa dos tipos de baterias de íon lítio	42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO LITERATURA / DESENVOLVIMENTO	12
2.1 REUSE OF LAPTOP BATTERIES FOR APPLICATION IN PV OFF-GRID SYSTEM: A CASE STUDY.....	13
2.2 ENERGIA EÓLICA	26
2.3 BIOENERGIA.....	27
2.4 ENERGIA DOS MARES	28
2.5 ENERGIA HÍDRICA.....	29
2.6 SISTEMAS HÍBRIDOS	30
2.7 ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	31
2.7.1 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	33
2.7.2 CONTROLADOR DE CARGA.....	35
2.7.3 INVERSOR OFF-GRID	36
2.7.4 BANCO DE BATERIAS	36
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

É de conhecimento geral que o cuidado e a manutenção do meio ambiente são preocupações crescentes. Um exemplo de preocupação frequentemente abordado é o descarte de baterias de lítio (ALAGO, 2021). À medida que novas tecnologias vão surgindo, aliadas ao aprimoramento dos processos produtivos, nosso consumo também aumenta, evidenciando a importância do enfoque em soluções onde possa haver uma coexistência entre nossos gastos, desde matéria prima até produto, aliados à menor taxa de danos possível ao mundo onde vivemos. Um dos aspectos mais importantes da atualidade, referente à sustentabilidade, é o desenvolvimento de formas de geração de energia através de fontes renováveis, sendo a solar uma das mais utilizadas no mundo.

Em vista da utilização crescente da energia solar, tanto as indústrias quanto as residências comportam sistemas de geração e armazenamento desta energia, o que tem se tornado cada vez mais acessível e aprimorado em termos de maturidade tecnológica. Diante desta acessibilidade, as residências atualmente possuem dois tipos de sistemas de armazenamento e utilização de energia fotovoltaica, sendo elas: *on-grid* e *off-grid*. O primeiro trata-se de um sistema onde a luz solar é captada e convertida em energia elétrica. Essa eletricidade vai para a rede elétrica da concessionária e o excedente é transformado em créditos a serem vendidos posteriormente. O segundo possui similaridades com o sistema *on-grid*, porém a particularidade é relativa ao fato de que não é conectado a uma rede elétrica. A energia que sobra é armazenada em baterias. Neste último caso, existe variabilidade quanto à composição dos dispositivos de armazenamento comercializados no mercado. Entretanto, o enfoque deste trabalho está direcionado nos estudos e aplicação em torno das baterias de íons de lítio, devido ao fato de se destacarem entre as outras como sendo as que possuem maior densidade de armazenamento energético. Estes objetos possuem ampla aplicação, sendo implementados em aparelhos como notebooks, o que facilita consideravelmente sua obtenção em empresas de lixo eletrônico. Dispositivos de armazenamento de energia de notebooks são compostos por conjuntos de células 18650, as quais serão abordadas ao longo desta dissertação.

Em razão da constante globalização, o surgimento e crescimento da internet permitiram o acesso a materiais potencialmente úteis das mais diversas áreas do

conhecimento, sejam elas cientificamente formalizadas ou não. Por esse motivo, muitos dados são disponibilizados nesse ambiente de forma predominantemente empírica. Um dos resultados de grande difusão de prática na internet são as aplicações relativas às células 18650, as quais já apresentam exemplos de reutilização em projetos diversos. Inclusive, eles são comercializados como produtos tanto individualmente quanto na forma de baterias em sites como Mercado Livre, AliExpress e Shopee, por exemplo. Apesar de existirem inúmeros vídeos na plataforma YouTube que demonstram aplicações baseadas nestas baterias, dados sobre terminologia, montagem e comercialização de baterias a partir de células 18650 ainda são significativamente escassos dentro de materiais científicos e literaturas de forma geral, carecendo de fundamentação teórica registrada. Por esse motivo, acentua-se a importância de direcionar estudos que possam comprovar, registrar e formalizar as técnicas e teorias em torno do emprego destas células

No que tange ao aspecto da reutilização, pode-se estabelecer que dar um segundo ciclo de vida útil às células 18650, além de reduzir custos de implementação, também possui contribuições ambientais, por dois motivos. O primeiro, aplicando as unidades como local de armazenamento energético de energia oriunda de uma fonte renovável. E a segunda sendo a redução do descarte das células, passíveis de serem nocivas ao meio ambiente.

O objetivo deste trabalho é estudar meios que viabilizem a reutilização de baterias de notebook para alimentação de sistema off-grid residencial de forma a torná-lo factível, buscando desempenhar uma análise sobre os principais fatores contribuintes para a reutilização das pilhas.

2 REVISÃO LITERATURA / DESENVOLVIMENTO

A energia é um recurso de grande importância no mundo (MOREAU, 2013). Sua origem reside em diversos tipos de fontes, como eólica, térmica, nuclear, hídrica, solar, entre outros. Estas fontes constituem dois grupos, sendo eles: fontes não-renováveis e renováveis. O primeiro grupo corresponde às fontes advindas de recursos finitos, onde sua disponibilidade é abundante, porém, uma vez esgotados, a restituição natural é lenta, sendo incompatível com condições temporais humanas. Aliado a isso, estas fontes são responsáveis pela emissão de poluentes na atmosfera. A exemplo disso, tem-se o petróleo e o carvão mineral, sendo eles origens de combustíveis e utilizados para geração de energia a partir de sua queima. O segundo grupo contém fontes onde os recursos utilizados para a geração de energia são recuperados de maneira natural em pouco tempo e estão presentes em abundância na natureza. Em razão disso, estes recursos denotam formas de energia alternativas e limpas, visto que, além de não gerarem emissão de poluentes, podem ser substituições favoráveis às formas convencionais de obtenção de energia, com o propósito de tanto preservar o aporte natural do meio ambiente quanto reduzir a poluição. Além de possuírem fontes abundantes e inesgotáveis na escala de tempo humana, as energias renováveis possuem variabilidade significativa quanto às suas categorias. Cada uma advém de um tipo de fonte natural, sendo elas eólica, biomassa, marés, hídrica, sistemas híbridos e solar. No Brasil, as fontes de energia renováveis equivalem a 83% de toda matriz energética do país (BRASIL, 2023).

2.1 REUSE OF LAPTOP BATTERIES FOR APPLICATION IN PV PFF-GRID SYSTEM: A CASE STUDY

Reuse of laptop batteries for application in PV off-grid system: a case study

Abstract

Technologies that aid in the generation of different forms of alternative energy are currently among the main subjects that guide a large part of the debate on environment and sustainability. Among the most commonly used forms of power generation, on-grid and off-grid photovoltaic systems are prominent, considering the abundance of the generation source. Off-grid or autonomous systems depend on energy storage and, for this, they use batteries. The battery construction is generally based on the association of cells. This article presents the main theoretical and constructive requirements that characterize a battery, based on the association of reused 18650 cells taken from laptops, with the purpose of acting as a storage bank for a future off-grid system. This article highlights the economic viability of this reused battery compared to a new battery with the same characteristics.

Keywords: 18650 cells; autonomous; C-Rate; battery reuse; photovoltaic.

1. Introduction

In the contemporary global context, it is common knowledge that natural resources are exhaustible. Towards the growing demand for energy, the search for alternatives (HEATH et al., 2022) that can meet human needs within the sphere of the environment has become a matter of primary concern. Therefore, the importance of a balanced coexistence between human exploitation and the preservation of natural resources is emphasized, which denotes sustainability.

Electric energy is one of the most widely used forms of energy worldwide owing to its flexibility of use, ease of transport, and installed infrastructure. The need for cohesion with sustainable development is among the main challenges in the search for alternative means of obtaining energy. One of the most prominent forms of energy today is photovoltaic (PV) energy, given the abundance of the source, characterized by the capture of energy through the incidence of light rays on PV panels. As with any other energy production method, one of the main obstacles to its development and application are economic issues. It should be noted that, currently, economic aspects and green technologies are increasingly a decision factor in negotiations on the global stage (DANTAS, 2014).

An economic barrier to the use of solar energy is linked to the specificity of its production, namely, its exclusive daytime production and more intense production on sunny and cloudless days. Thus, it is impossible for the energy matrix of a region to be exclusively solar without storage or supply interruption. Therefore, the solution for the effective use of PV energy involves storing or supplying a complementary source, such as hydroelectric power, and transferring surplus production. These characteristics determine the type of PV installation.

The production of photovoltaic energy is divided on two types, on-grid and off-grid, and there may also be hybrid systems (BASARAN, 2017). Each of these systems is characterized in terms of the distribution and storage of electricity. On-grid systems do not store energy in a residence. In the generation excess moments, the energy surplus is transmitted to the distribution network, generating credits to be compensated on periods constituted by insufficient or no generation. In this case, batteries can be compared with the lake of a hydroelectric plant, which starts to produce less energy when there is a PV source entering the system (CAZZANIGA et al., 2019). Conversely, the off-grid or autonomous system is defined as the one in which solar energy, captured and converted into electricity, is used on-time and its surplus is stored in one or more batteries for use in unlit periods or periods of insufficient generation. Unlike an on-grid system, an autonomous system is not connected to a distribution network (FALK et al., 2020). The batteries of the off-grid system also act as regulators of the power supplied by the system, for example, when a cloud blocks the sun slightly.

In this article, investigations were conducted on the systematic assembly and operation of a battery for application in a hypothetical autonomous system. Currently, there are several types of storage devices, each with a different

composition and function. However, our focus is on the lithium-ion batteries, also known as LIBs, acronym derived from Lithium-Ion Batteries (FALK et al., 2020). This is attributed to the fact that lithium batteries have the highest energy storage density among the batteries currently on the market. Techniques for the advancement of lithium batteries using the most diverse materials and procedures for the construction of their electrodes, are of great interest in the current literature (MURALIDHARAN, 2020). The advantage of the LIBs is their wide application in many pieces of equipment, such as laptop batteries, which makes it possible to obtain them on a large scale from electronic waste companies. More specifically, the LIB addressed in this study consisted of a set of several 18650 cells.

It is essential to first define the composition of a battery and differentiate it from a cell. Typically, the smallest unit of charge in a battery is a cell. In this project, 18650 cells were used; i.e., cylindrical cells with a diameter of 18 mm and an axial length of 65 mm. Considering the context of these cells, this work aims to develop a method that enables the reuse of 18650 cells extracted from laptop batteries to power an off-grid photovoltaic system, seeking to analyze the main factors that support the use of such cells.

With the advent of the internet, which constitutes an eminent form of communication and expression, the access to instructive materials from different niches, whether scientific or otherwise, has become increasingly common. The volume and variability of these resources have grown as a result of globalization. However, this content is presented in a predominantly practical manner and lacks a registered theoretical basis. Thus, a systematic study of these materials could result in an important scientific contribution. One of the such things, which is the result of extensive internet culture, is the application and techniques around the use of 18650 cells, and in the form of batteries on shopping sites such as Ebay, “Mercado Livre”, OLX, AliExpress, among others. There are numerous videos available on online video platforms, such as YouTube and Facebook, which can be found on a quick search for systems assembled with batteries from these cells. In general, these practical videos do not possess the rigor of scientific publications. Strictly speaking, there are few data on the terminology, conditions, commercialization, and assembly of batteries with 18650 cells in the scientific literature or materials, which emphasize the importance of conducting studies that prove, formalize, and register the procedures, theories, and techniques present in the use of these cells.

Considering the reuse, the fact of giving a “second life” to these devices, in addition to reducing costs for their application, also emphasizes their environmental importance, for two main reasons. First, it will result in a decrease in material disposal (ISLAM, 2022) potentially harmful to the environment. Second, these devices can be applied as storage means for energy generated from renewable sources.

The disposal process of cells and batteries covers from the appropriate place for initial disposal to the final destination of the waste. This includes current regulations regarding the procedure in question. In Brazil, the National Council for the Environment (CONAMA, 2023) regulates the final disposal of energy-accumulating devices. In Article 22, the Council determines the inappropriate forms of final disposal, namely launching and/or burning in the open, without duly licensed equipment, and launching in water bodies or places susceptible to flooding. Although disposal is established by law, it is a procedure that still encounters obstacles in several ways, both in terms of proper disposal and the number of specialized places that extract and use cell elements. This demonstrates that the reuse of cells can provide a significant and useful life extension for these devices, allowing their disposal to be reduced. According to Chen and Shen (2017), three reasons support reuse to reduce disposal:

- a) Scarcity of sites dedicated to the recovery of elements from cells;
- b) The cost of recovering elements from the cells is higher than that of obtaining or mining them.
- c) When cells are marked for destruction, they are not selected, causing this process to lose both reusable and unusable units.

The objective of this work is the study around the reuse of cells exclusively from laptop batteries, given the abundance of this material, the ease of finding these items in electronic waste companies and, consequently, the standardization of the cost of these batteries.

2. Theoretical battery sizing

The aim of battery sizing is to establish its ideal size for the desired application. For example, for a battery in a portable tool such as a drill, the battery must be equally portable to avoid compromising the ergonomics of the device. Simultaneously, the battery must supply sufficient power to operate electrical appliances. The battery of a car follows the same rule, but it must be much larger, as it does not need to be operated with the hands, but

rather be transported by the car. It also needs to provide much greater power than that needed to operate a battery drill.

In this article we are going to dimension the minimum size of a battery to store the energy “generated” in a residential PV system. In a house, we do not need to have a portable battery, so the maximum size of the battery will not be considered, assuming we do not have space limitations for storage as the dimensions of a battery are much smaller than those of a house.

To determine the minimum battery size, two variables should be considered: the maximum power (P_{max}) that the battery must supply, and the time (t) that a battery must support the residence in question (battery autonomy). The autonomy of the battery without recharging is directly proportional to the charge that the battery (C_{bat}) is capable of storing; therefore, we can focus our efforts on finding either of these two variables.

Let us start with the maximum power that the battery needs to supply because the insufficiency of this parameter makes it impossible to use the battery, even for a short time. To supply P_{max} , a battery working at voltage U_{bat} must supply the maximum current I_{max} that satisfies Eq. (1).

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{U_{bat}} \quad (1)$$

The battery is composed of a set of packs. Each pack is a group of cells formed by n_p cells connected in parallel. While assembling the battery, the number of groupings (n_s) (see Fig. 1) should be considered. This indicates the constructive form of the device, including its commercial nomenclature. An example of the assembly is shown in Fig. (1). It can be found on e-commerce sites under the nomenclature 4S5P.

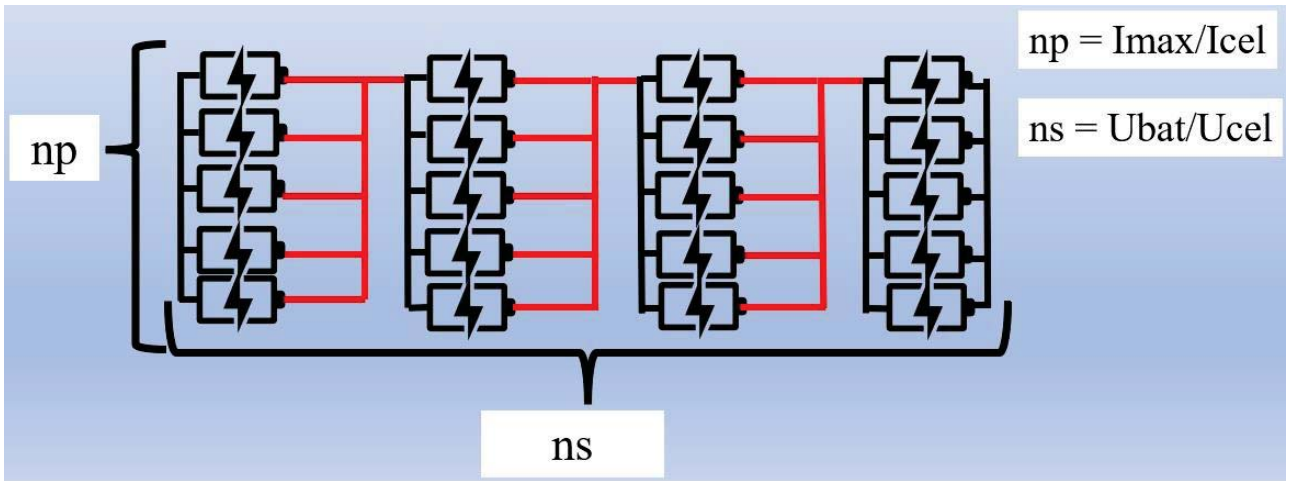


Figure 1 Scheme of the assembly of packs and cells. Source: the authors

A pack is characterized by cells connected in parallel. In a parallel-cell connection, individual cell currents (I_{cel}) are added, resulting in I_{max} , and the voltage of each cell (U_{cel}) is the same. Therefore, each grouping can be considered as having the same voltage as a single cell (U_{cel}), and its current value depends on the number of cells contained in the pack. For standardization and structuring purposes, a battery is considered as a set of packs connected in series. Therefore, the number of packs corresponds to the ratio between the battery voltage (U_{bat}) and the individual voltage of each cell. In terms of the variables, we obtain:

$$n_s = \frac{U_{bat}}{U_{cel}}, \quad (2)$$

$$n_p = \frac{I_{max}}{I_{cel}} \quad (3)$$

Strictly speaking, n_s and n_p need to be integer numbers because there is no cell fraction; therefore, when assembling a battery, the values of n_s and n_p in the Eqs. (2) and (3) should be rounded to obtain integers for the construction of the battery without mischaracterizing its sizing. Substituting Eq. (1) in Eq. (3), we obtain

$$n_p = \frac{P_{max}}{U_{bat} \times I_{cel}} \quad (4)$$

As previously mentioned, the current increases in parallel connections. As the current is the charge variation rate with respect to time, in this type of connection, charges are also added, so that the total battery charge (C_{bat}) is the product of the number of cells in parallel (n_p) by the charge of each cell (C_{cel}). Representing this product with the n_p given by Eq. (4), we obtain

$$C_{bat} = \frac{P_{max}}{U_{bat} \times I_{cel}} \times C_{cel}. \quad (12)$$

From basic physics (HALLIDAY, 2006) we know that the energy (potential) stored in a battery (E_{bat}) is the product of the charge stored in the battery (C_{bat}) by its potential difference (U_{bat}). By using the expression C_{bat} given in Eq. (12), the product can be conveniently written as follows:

$$E_{bat} = \frac{P_{max} \times C_{cel}}{I_{cel}}. \quad (13)$$

3. Materials and Methods

The work began with the purchase of a batch of laptop batteries from an electronic waste company. The Fig. (3) shows an example from this lot of batteries before the intervention.



Figure 3: Laptop battery as it was discarded, without any intervention.

To extract 18650 cells, it was necessary to disassemble the battery case, as shown in Fig. (3), which has a set of cells connected by nickel strips on a BMS (Battery Management System), as shown in Fig. (4).



Figure 4: Inside the battery in Fig. (3) before the cells were separated.

The next step is to separate the cells and sand them using a micro grinder to eliminate burrs. In this process, the cells were pre-selected; those with oxidation, openings, leaks, corrosion, or other structural damage were separated for proper disposal.

After sorting, the cells that did not present any apparent structural damage were identified in their body with a code so that they could be individualized and easily identified as coming from the same battery, if this was relevant in the analysis of data. Other data were collected in an electronic spreadsheet associated with the code noted on the body of the cell. In Fig. (5) 18650 cells can be seen in this cataloging process.



Figure 5: Batteries of cells being separated and cataloged after dismantling and treating laptop batteries.

After cataloging with the help of a smart charger, the LiitoKala Engineer LII-500 (see Fig. (6)), a definitive selection of cells was performed based on the collected data, as shown in Tab (1). The LII-500 holds up to four units simultaneously (see Fig. (6)), where the tests are independent; i.e., there is no interference, according to the manufacturer, of a cell test owing to the presence or absence of other(s) in the device.



Figure 6: LiitoKala smart charger Engineer LII-500 testing a set of cells.

The procedure for testing each cell with LiitoKala Engineer LII-500, consisted on:

FastTest: total charge of the cell, with record of charge quantity and time (**load time**) for this process. Before carrying out the charging process, the device automatically discharges each unit to eliminate possible residual charges present in the cells.

NorTest: total discharge of the cell, with record of the amount of charge supplied by the cell to the device and the time (**unload time**) required for this discharge.

The device also measures a parameter that evaluates the dynamic resistance of the cell (mR). Although the manufacturer does not inform the unit of this measure, it can be used as a parameter for comparison between the cells; that is, the lower the resistance, the higher the quality of the cell. This parameter was recorded for the completely unloaded cell (**mRFast**) and fully charged cell (**mRNor**). The Tab. (1) summarizes the collected data, organized by category.

Table 1 - List of collected data, categories and descriptions.

Item	Data Collected	Category	Description
I	NorTest	load quantity	Amount of charge delivered by the cell during the process of a complete discharge.
II	FastTest		Amount of charge received by the cell during the process of a full charge.
III	load time	test time	Elapsed time for a FastTest .
IV	unloading time		Elapsed time for a NorTest .
V	mRNor	dynamic resistance	Evaluates the internal dynamic resistance of the cell when fully loaded.
VI	mRFast		Evaluates the internal dynamic resistance of the cell, when fully discharged.

The quantitative criteria for cell selection were:

1. Minimum charge: if the charge of a given cell (C_{cel}) was less than 2000 mAh, the cell was discarded. This choice was based on most of the 18650 cells found in the market. New batteries with charge capacities greater than 2200 mAh are considered very good and are generally more expensive than the average. Therefore, a used battery that maintains 2000 mAh has lost, on average, approximately 10% of its charge capacity compared to a very good new cell.

2. Ability to hold charge while isolated: the cell must not discharge spontaneously. All the approved cells lost less than 5% of charge after 30 days.

3. Temperature: cells that were overheated (more than 50 °C) during the charging or discharging processes were discarded. This disposal, in addition to efficiency, provides safety and minimizes risks in battery assembly and testing, as these cells may degrade (KONG, 2018).

Once all these factors are satisfied, the cell can be selected for composing the battery. The tests were performed at a DC load current of 500 mA and a DC discharge current of 250 mA, both constant. However, consulting the datasheets of several 18650 cells (see Tab. (2)), the lowest value found for the operating current (standard) was 440 mA and even these cells supported a maximum current of at least 2200 mA. So, it is not an exaggeration to believe that the maximum current of 500 mA would give us a wide margin of safety, because in a residential application, the current consumed would be less than the maximum most of the time, because it would be difficult to turn on all the electrical equipment in the residence simultaneously.

Table 2 - Comparison of capacity, current and C-Rate values for different brands of cells.

Brand	Model	Load Current (mA)	Nominal Charge (mAh)	Discharge Current (mA)
Panasonic	NCR18650GA	1475	3300	10000
Samsung	ICR18650 -22P	1075 (default); 2150 (fast)	2000	2150 (default); 10000 (maximum with continuous discharge)
Samsung	INR18650-30Q	1500 (default); 4000 (maximum)	2700	10000 (maximum with continuous discharge)
EEMB	LIR18650	520 (default); 1300 (fast)	2600	520 (default); 1300 (fast); 2600 ("maximum pulse")
Hunan Sounddon	ICR18650	0.2C5 (default); 2200 (maximum)	2200	0.2C5 (nominal); 0.5 C5 (default)
Tenergy	30003	0.5C (default); 1C (maximum)	2200	0.2C (nominal); 2C (maximum)

To understand Tab. (2), the concept of the C-rate is required. A C-rate equal to XC is defined as the discharge rate at a constant current of $X \times C_{bat}$, which completely discharges the battery at a time of $(1/X)$. For example, at a C-Rate of 0.2C, a 2200 mAh battery takes 5 h to fully discharge at a current of 440 mA (MIT, 2008). Concerns regarding the rate and techniques to increase discharge rates have been studied in the current literature (CUI, 2018) because, with a higher discharge rate, it is possible to have a smaller battery in most of the situations.

4. Cell results

The analyzed batteries lot consisted of 138 laptop batteries purchased from an electronic waste company, totaling US\$ 180.59. The lot was acquired in three stages to reduce defects in a given shipment acquired by the company. After dismantling the batteries, 777 cells were counted.

From the 777 cells, 396 had a load capacity greater than or equal to 2000 mAh, which corresponding to 51% of the total lot. This number refers to the number of approved cells, as all cells that presented $C_{cel} \geq 2000$ mAh were also approved in all other selection criteria.

Table 3 - Main results of the tested batteries lot.

Quantity	Variable	Value
Number of batteries in the analyzed batch	n_{lot}	138
Batch value of analyzed batteries	v_{lot}	US\$ 180.59
Total number of cells approved in the batch	n_{ca}	396

It is common for selection criteria to overlap. Generally, cells that were overheated during the charging process did not maintain the charge after being charged, often had an excessive charging time, and were even abandoned without completing the charging process, after twice the average time that the other cells spent charging completely.

Similarly, the overlap of positive information in the analysis of the parameters of the approved cells provides robustness to the criteria used ($C_{cel} \geq 2000$ mAh) and increases reliability to the approved cell. The approved cells exhibited comparable values for charge amount, test time, and dynamic resistance.

Load amount: The best-quality cells showed similar values in the FastTest and NorTest. Values close to these measurements indicate that the charge received by the unit in the charging process was not lost owing to unwanted effects, such as heating, and was fully or mostly returned by the cell in the discharging process; that is, this cell approached a conservative system.

Test time: Proportionality of charge and discharge time values, that is, as the cell is charged with twice the discharge current, it should take half the time in the charge process than in the discharge process, thus showing that both regimes, the charge and the discharge, the cell receives and gives the same amount of charge.

Dynamic resistance: The parameter is inversely proportional to the cell load and fluctuates. The unit has a greater dynamic resistance when unloaded than when loaded. The lower the value, the better the cell because it has a low resistance to the flow of charge, that is, the current. The approved cells commonly had lower dynamic resistance values compared with those that were discarded.

5. Application (case study)

The case study presented below starts from the creation of an archetypal house powered by an off-grid photovoltaic systems, in which one of the fundamental parts is the battery studied in this article. To idealize the model house, we initially defined the number of residents and main devices of a residence, as shown in Tab. (4).

Table 4 - Aspects considered for the formulation of the archetypal house.

Aspect Considered	Description
Number of Residents	A standard family was considered, consisting of 4 (four) residents, 2 (two) adults, and 2 (two) children.
Individual Power	In addition to the number of residents, the devices and equipment powered in the house are key factors with regard to the consumption and peak current of the residence. Within the dimensioning premise, a residence is composed, at least, of 1 (one) shower, 1 (one) refrigerator, 1 (one) washing machine, 2 (two) TVs, lighting, and household appliances in general. Among these, the shower is the one with the highest consumption.
Period of Use	The daily operating time of an appliance or lighting device is another factor that works in synergy with power and the number of residents, in terms of consumption.

An inference was also made about the specifications of the equipment and the habits of the fictitious residents of the archetypal house to estimate the average monthly and daily consumption of this residence. The main specification of the appliances is their power consumption. Residents' habits imply their usage time. The electric shower had the highest power consumption value. The daily use time was 32 min, considering 8 min a day for each resident. The refrigerator is connected to the electricity network 24 h a day, but its operation is intermittent; therefore, we considered 5 h of daily use, in which it consumes nominal power added to the peak power. A similar procedure was used for the washing machine which, at peak power, is the second most consumed piece of equipment. However, a small daily period was considered so that it could add up to a compatible consumption value because the washing machine has a wide range of operating power. For the other equipment, the nominal power, time of use, and number of days of use per month were considered (PROCELINFO, 2023), as listed in Tab. (5).

Table 5 - List of equipment in the archetypal house (PROCELINFO, 2023).

Device	Amount	Maximum power (W)	Uninterrupted time of daily use (h)	Maximum daily consumption (kWh)	Monthly usage time (d)	Monthly consumption (kWh)
Shower (5500 kW)	1	5500	0.53	2.93	30	88.00
Refrigerator (1 door)	1	150	5.00	0.75	30	22.50
Washing machine	1	400	0.37	0.15	12	1.76
TV 21"	Two	90	4.00	0.72	30	21.60
Lighting	4	15	5.00	0.30	30	9.00
Total	9	6155	14.90	4.85	132	142.86

The parameters listed in Tabs. (4) and (5) may change depending on the number of residents, their habits and the electrical equipment in the house. However, the main objective is to obtain an order of magnitude of battery value to serve the off-grid system of a residence, and maintain the economic viability of this system. Therefore, the values presented here can be used as parameters for quick comparisons through a simple proportional relation, or even for deeper studies through more elaborate relations.

6. Results of the case study - economic viability

With data from Tables 3 and 5, and Eqs. (9), (10), (11), and (13), the set of numerical results is presented in Tab. (6).

Table 6 - Values related to the battery built to supply the PV system of the archetypal house.

Greatness	Variable	Value
Desired number of cells	n_{cel}	3327
Value of each approved cell	v_{ca}	US\$ 0.46
Desired batch value of batteries	v_{tot}	US\$ 1,578.21
Total number of batteries to be purchased	n_{tot}	1160
Battery power	$E_{bat} \geq$	24.62 kWh

For the feasibility analysis, a quote was made for values of 18650 new cells with at least 2000 mAh. The quote was made on marketplace sites, discarding products that clearly present some type of information that is certainly incorrect in the advertisement, such as 9900 mAh 18650 cells, as it is impossible to have this charge in a cell of this size with current lithium-ion technology.

The lowest value found was US\$ 3.04 per cell. We do not have any reference from the seller or any quality guarantee for these cells; therefore, it is possible that the purchase from a supplier with a certified quality guarantee may present a unit value even greater than that found in this online quotation.

The first feasibility analysis consists of a simple comparison between the value of the new cell (US\$ 3.04) and reused cell (US\$ 0.46), which results in a ratio of 6.6 times, or even the reused cell costs approximately 15% of the value of a new cell.

The cell price analysis is just one element to be verified, as an on-grid photovoltaic system used to power the house in our case study would cost approximately US\$ 2,256.00. Initially assuming that the cost of an off-grid system is the value of the on-grid system plus the value of the battery, an off-grid system with reused cells would cost something in the order of US\$ 3,334.00, while the same system with a battery of new cells would cost approximately US\$ 12,365.00.

An on-grid system of this size has an estimated payback period of five years. By making a simple ratio, an off-grid system with reused cells would have a minimum payback time of approximately 8 years, whereas the same system with new cells would have a minimum payback time of approximately 27 years.

A quick analysis shows that the system in this case study with new cells would be unfeasible because the lifespan of the PV system is 25 years. A more detailed analysis could accentuate or attenuate the results of this work.

Finally, we need to estimate the time required for the battery to supply the archetypal house. To achieve this, we divided the total energy stored in the battery (Eq. (13)) according to the maximum daily residential consumption (Tab. (5)). This resulted in an autonomy of five days. This result implies that once charged, the battery would be able to keep the house running for five days without any sunlight. Therefore, even in periods of low solar intensity, and rainy and cloudy days, this autonomy tends to be greater. The magnitude of this difference requires further study.

7. Conclusion

The criterion for selecting cells by load capacity ($C_{cel} \geq 2000$ mAh) proved to be quite robust, since all cells that met this criterion also met the others.

Based on the results presented, it can be concluded that, at least for this case study, the reuse cells in the construction of the PV system battery can make the off-grid system viable, because its assembly with new 18650 lithium cells is economically unfeasible, and the Return of Investment time is greater than its lifespan.

When estimating the value of the off-grid system, we simply added the value of the on-grid system to the value of the cells used to assemble the battery. This approximation is reasonable because these are the largest costs of an off-grid system, but a closer analysis would require a more powerful inverter as well as a charge controller, BMS, cables, and other materials. This further increases the price of the off-grid set, making it even more economically unfeasible with new cells. For off-grid systems with reused cells, a more detailed study is required to obtain reliable return times.

An important finding is the percentage of approved cells (of $396/777 = 51\%$). According to the chosen usage criteria, approximately half of the cells condemned by laptop users can continue to be used. Although the environmental value of this reuse has not been added, we have gained on sustainability, which is undeniable and even material for other studies.

Another factor that cannot be overlooked is the cost of reusing the cells, which was very low because no recycling was conducted (RAHMAN, 2017), which would certainly consume energy, machinery, and adequate facilities, increasing the value of the recycled product. The largest cost is the labor in the process. However, dismantling the batteries and testing the cells required approximately 5 months. Therefore, the processing of $n_{tot} = 1160$ batteries, aiming to obtain $n_{cel} = 3327$ cells, would require more time, labor and/or equipment.

A factor that was not considered in this article and will certainly be a very important factor in the viability of this project is the durability of batteries made with reused cells. This analysis will be conducted in future works. For now, we can say that we have a battery made with reused cells that is operational in a prototype electric vehicle in the research group of the authors of this work.

Finally, we conclude that an off-grid system is likely to be viable if the battery is built with reused cells, and that there is little chance to be feasible if the same battery is assembled with new cells. Although the numbers presented in this work are not sufficient for decision-making, they serve as a guide and open possibilities for many other studies on this topic. Some of these studies are under investigation for future works.

8. Bibliographic references

BASARAN, K; CETIN, NS; BOREKCI, S. Energy management for on-grid and off-grid wind/PV and battery hybrid systems. **IET Renewable Power Generation**, v. 11, no. 5, p. 642-649, 2017.

CAZZANIGA, R. et al. Integration of floating PV systems with hydroelectric power plants. **Heliyon**, v. 5, no. 6, 2019.

CHEN H; SHEN J. A degradation-based sorting method for lithium-ion battery reuse. **PLoS One**, v. 12, no. 10, p. e0185922, 2017.

CONAMA: National Council for Environment. Resolution No. 401 on November 4, 2008. Establish the maximum limits of Pb, Cd, and Hg for cells and batteries sold in the national territory, and the criteria and standards for environmentally appropriate management and other measures. Published on DOU no. 215 of November 5, 2008, Section 1, page 108-109. Available at:http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=570. Accessed July 11, 2023.

- CUI, D; WANG, J; SUN, A; SONG, H; WEI, W. Anomalously faster deterioration of LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂/graphite high-energy 18650 cells at 1.5 C than at 2.0 C. **Scanning**, v. 2018, 2018.
- DANTAS, TB. Economic degrowth: Nature as a limit to growth and the new context of the green economy. In: Belinda Pereira da Cunha; Sergio Augustine. (Org.). Environmental sustainability: Legal and social studies. 1st edition Caxias do Sul: Educs, 2014, v. 1, p. 317-335.
- HEATH, GA; RAVIKUMAR, D; HANSEN, B; KUPETS E. A critical review of the circular economy for lithium-ion batteries and photovoltaic modules—status, challenges, and opportunities. **Journal of the Air & Waste Management Association**, 72 (6), p. 478-539, 2022.
- ISLAM, MT; HUDA, N; BAUMBER, A; HOSSAIN, R; SAHAJWALLA, V. Waste battery disposal and recycling behavior: A study from the Australian perspective. **Environmental Science and Pollution Research**, 29, 39, p. 58980-59001, 2022.
- KONG, D; WEN, R; PING, P; PENG, R; ZHANG, J; CHEN, G. Study on degradation behavior of commercial 18650 LiAlNiCoO₂ cells in over-charge conditions. **International Journal of Energy Research**, 43 (1), p. 552-567, 2019.
- MIT Electric Vehicle Team, A Guide to Understanding Battery Specifications, December 2008. Available at:http://mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf, accessed 07 Feb 2023.
- MURALIDHARAN, et al. Lithium Iron Aluminum Nickelate, LiNixFeyAlzO₂—New sustainable cathodes for next-generation cobalt-free Li-ion batteries. **Advanced Materials**, v. 32, no. 34, p. 2002960, 2020.
- On-grid and off-grid Photovoltaic system studies. 2019. Completion of coursework (graduation): University of Araraquara, Araraquara, 2019.
- HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J. Fundamentals of Physics. **LTC**, vol. 3, 7ed. 2006.
- FALK, J; NEDJALKOV, A; ANGELMAHR, M; SCHADE, W. Applying Lithium-Ion second life batteries for off-grid solar powered system—a socio-economic case study for rural development. **Zeitschrift für Energiewirtschaft**, v. 44, no. 1, p. 47-60, 2020.
- PROCELINFO, Brazilian Center for Energy Efficiency Information: table with an estimated average monthly consumption of household appliances according to hypothetical use, Available at: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BE6BC2A5F-E787-48AF-B485-439862B17000%7D> Accessed on 21Jun2023.
- RAHMAN, A; AFROZ, R; SAFRIN, M. Recycling and disposal of lithium battery: Economic and environmental approach. **IJUM Engineering Journal**, v. 18, no. 2, p. 238-252, 2017.

2.2 ENERGIA EÓLICA

A energia eólica tem como princípio ativo em sua geração correntes de vento. A captação é feita por meio de turbinas eólicas, denominadas aerogeradores. A corrente de ar flui pelas pás dos aerogeradores, provocando sua rotação. Em consequência disso, a energia cinética provocada pelos ventos é convertida em energia elétrica (D'AQUINO; CREPALDI, 2021). Indiretamente, a energia eólica advém do sol, uma vez que os ventos são gerados a partir do aquecimento, sob diferentes orientações de raios solares, da atmosfera terrestre (DUTRA, 2008). Sob a ótica do que denota a energia eólica favoravelmente, pode-se citar o rápido retorno de investimento (ROI) para equipamentos dessa modalidade, redução de emissão de gases de efeito estufa, possibilidade de criação de postos de trabalho, gerando empregos, e por ser proveniente de uma fonte humanamente inesgotável. Em contrapartida, esse sistema de geração de energia apresenta desvantagens, como agravo visual, dadas as dimensões dos equipamentos de captação, poluição sonora e a impossibilidade de coexistir sem ameaçar a fauna de aves e mamíferos voadores, uma vez que pode ocasionar colisão com estes animais (TERCIOTE, 2002).

Em termos de variabilidade, os geradores eólicos podem ser divididos em três sistemas: isolados, híbridos e interligados à rede (REIS, 2019). O primeiro sistema tem como característica primordial, em geral, a utilização de baterias para de armazenamento da energia gerada. Em decorrência disso, estes sistemas devem possuir um controlador de carga, para que a ela não exceda o limite da bateria e venha a danificá-la enquanto estiver carregando, ou durante o processo de descarga. Os sistemas híbridos também são isolados, porém contam com formas de geração variadas em conjunto com o aerogerador eólico, como painéis fotovoltaicos e geradores diesel (DUTRA, 2008). Como consequência, tem-se um sistema geral de complexidade significativa, o que demanda que cada um dos geradores subordinados tenha seu próprio recurso de otimização de energia, para que a energia final fornecida possua a maior eficiência possível. Em terceiro lugar, existem os sistemas interligados à rede, os quais exigem um número considerável de turbinas eólicas e estão ligados diretamente à rede elétrica, dispensando a necessidade de meios de armazenamento. Por último, existem os geradores off-

shore, onde sua base de funcionamento não está localizada em terra firme, o que permite o aproveitamento da energia dos ventos sob condições ambientais diversas (CASTRO, 2009). As turbinas operam em alto mar, o que é vantajoso em termos de espaço físico, porém tem alto custo logístico e de instalação.

2.3 BIOENERGIA

A bioenergia é definida como a energia que utiliza a biomassa como matéria-prima. A biomassa consiste em um recurso renovável correspondente à matéria orgânica de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada como fonte de energia, seja para geração de eletricidade ou calor. Além de poder gerar energia de forma direta, a biomassa é também amplamente utilizada para produzir biocombustíveis. Exemplos de biomassa incluem cana-de-açúcar, madeira, casca de arroz, casca de eucalipto, restos de alimentos e madeira. Atualmente, a biomassa corresponde a processos com grande variabilidade e diversidade, sendo possível obtê-la de diferentes maneiras. De forma geral, para a geração de energia, a biomassa pode ser utilizada de duas formas: queima direta ou conversão termoquímica. No primeiro caso, o processo envolve o vapor como princípio ativo, que é gerado a partir da queima de resíduos orgânicos e vegetais. O vapor obtido movimentava as pás das turbinas dentro de usinas termelétricas, resultando na rotação do gerador. No segundo caso, ocorrem reações químicas que geram produtos na forma gasosa, que normalmente são os biocombustíveis. Atualmente, etanol obtido a partir da cana-de-açúcar tem o maior destaque em termos comerciais no âmbito dos combustíveis provenientes da biomassa. No Brasil, 40% do etanol que abastece veículos de passeio tem origem na cana-de-açúcar (GOLDEMBERG, 2009).

A utilização da biomassa como fonte de energia alternativa apresenta uma série de fatores favoráveis. Além do seu baixo custo, pode ser obtida a partir de diversos constituintes, o que a torna um recurso acessível em termos de disponibilidade de insumos. Outro aspecto que contribui para a atratividade dessa fonte é seu baixo índice de emissão de poluentes, bem como o fato de a produção de biomassa representar parte de um ciclo natural do planeta, denominado Ciclo do Carbono (GUITARRARA, 2021). No entanto, é importante reconhecer que a biomassa possui também desvantagens e desafios em sua obtenção e

aproveitamento. Dependendo de sua origem, a obtenção de biomassa pode causar desmatamento, retardando a restituição desses elementos na natureza. Isso faz com que recursos antes considerados renováveis passem a não ser mais, dado o longo período necessário para que eles se formem novamente na natureza. (GUITARRARA, 2021)

2.4 ENERGIA DOS MARES

A energia obtida a partir das marés é também conhecida como maremotriz. Seu princípio de funcionamento é baseado na conversão de energia cinética em eletricidade por meio do movimento das marés, transmitido a dispositivos de geração específicos. O processo pode ocorrer de duas formas: através de turbinas ou bombas hidráulicas. No primeiro caso, a água do mar é represada por meio de barragens, que possuem comportas que controlam o fluxo de saída hídrica. As turbinas estão localizadas em pontos inferiores das barragens. Naturalmente, as marés aumentam e diminuem, e é nesse princípio que essas turbinas se baseiam para operar. As barragens retêm o fluxo de água e com isso o nível aumenta. Por conseguinte, ao abrir as comportas, o fluxo passa pelas turbinas, da parcela onde antes o nível era alto, para a de nível baixo, desempenhando a geração de energia. O mesmo ocorre no sentido contrário. Já no segundo caso, a variação de nível das ondas faz com que boias ou flutuadores articulados oscilem verticalmente, ocasionando o bombeamento da água do mar. O fluxo bombeado é conduzido até as turbinas à alta pressão, fazendo com que sejam rotacionadas, transmitindo esta energia cinética para geradores, gerando eletricidade. O Brasil foi um ponto de instalação da primeira usina maremotriz da América Latina, localizada no Porto de Pecém, no Ceará (MALAR, 2021). Apesar de ainda ser pouco implementada atualmente, a energia maremotriz apresenta alto potencial de fornecimento, principalmente para cidades e regiões costeiras.

Assim como outros sistemas, a energia maremotriz tem vantagens e desvantagens, as quais devem ser consideradas para a construção de uma usina maremotriz. Os fatores favoráveis referem-se ao fato de ser uma fonte renovável, oferecer baixos riscos de danos ambientais e a abundância volumétrica da água, o que permite obter uma quantidade considerável de eletricidade. Em contrapartida, a

necessidade de haver condições favoráveis das marés e da geomorfologia para a geração de energia, aliada ao alto custo de investimento inicial em maquinário e equipamento, caracterizam desvantagens deste sistema (ALUGAGERA, 2021).

2.5 ENERGIA HÍDRICA

A energia hídrica, ou hidrelétrica, consiste na utilização das águas para geração de eletricidade. No entanto, diferentemente da energia maremotriz, a hidreletricidade é obtida a partir usinas hidrelétricas, instaladas em terra firme. As águas são represadas e formam um grande volume a uma determinada altura com relação às turbinas, suficiente para armazenar energia potencial gravitacional considerável. A queda faz com que o volume hídrico alcance altas velocidades, com grande vazão, por meio de tubulações, chegando até as turbinas. Neste local, a energia cinética das águas provoca a rotação das turbinas, acionando geradores que, por conseguinte, obtêm a eletricidade. Esta energia é direcionada para as redes de distribuição, que a conduzem para seus destinos, como residências, comércios e indústrias. Ao final deste processo, as águas que circulavam pelas pás das turbinas são escoadas por meio de condutos até escoadouros. Quanto à sua construção, as hidrelétricas dependem da disponibilidade de grandes áreas para criação e preenchimento de reservatórios volumosos o bastante para geração de energia em grande quantidade e período, além de suprir as demandas energéticas em épocas de baixo nível. A primeira etapa consiste no desvio do curso de um rio através da construção de barreiras, que retêm as águas, para uma área natural que servirá de reservatório. Ao final da construção, esta porção de mata é alagada. Em épocas de grande cheia, as usinas comumente abrem as comportas de seus vertedouros, escoando a água excedente, no interesse de não extrapolar os limites estruturais das barragens, eliminando os riscos de rompimento.

A grande disponibilidade de água, aliada aos baixos custos operacionais, fazem das hidrelétricas uma fonte de energia muito utilizada, visto que seu recurso principal é renovável. Outro ponto de vantagem reside na possibilidade de utilizar as águas que passaram pelo processo de geração para irrigação. Em concordância com isso, a emissão de poluentes em decorrência do processo é baixa. No Brasil, as usinas hidrelétricas constituem mais da metade do percentual de energia elétrica

gerada, de 63,8% (BRASIL, 2023), o que ressalta sua importância como uma das principais fontes de geração do país.

O contraponto às vantagens das hidrelétricas está contido, em essência, na sua construção. Como mencionado anteriormente, estas usinas são construídas a partir da utilização de áreas naturais como reservatório, juntamente com o desvio do curso de rios. Neste processo, ocorre o desmatamento de grandes áreas, prejudicando, além da flora, a fauna da região. Sem mencionar a possibilidade de extinguir espécies endêmicas. Em adição, para que ocorra o processo de alagamento sem perdas humanas, muitas residências e comunidades precisam ser abandonadas.

2.6 SISTEMAS HÍBRIDOS

Como mencionado anteriormente, existem sistemas eólicos híbridos, onde a geração principal é dada pelas turbinas eólicas, porém trabalham em conjunto com outros sistemas, sob o gerenciamento de dispositivos responsáveis por extrair a máxima eficiência de cada um. Esta premissa também é aplicável a sistemas hidrelétricos, onde é possível associá-los com sistemas fotovoltaicos.

A combinação de sistemas fotovoltaicos com hidrelétricos demonstrou, segundo estudo, um índice considerável de eficiência de produção energética. O exemplo mais claro para tal é a utilização de centrais de geração fotovoltaica flutuantes, que operam dentro de centrais hidrelétricas, combinando a geração de energia de ambos os processos. Sob o ponto de vista das centrais fotovoltaicas flutuantes, as centrais hidrelétricas desempenham praticamente função de grandes baterias de armazenamento, uma vez que, na ausência ou baixa incidência de luz, não há geração de energia pelos módulos fotovoltaicos e, por conseguinte, a energia a ser distribuída será da usina hidrelétrica. Ou seja, enquanto não está gerando energia, a central fotovoltaica flutuante tem como reserva energética a eletricidade gerada pela central hidrelétrica. Sob a ótica das usinas hidrelétricas, os sistemas fotovoltaicos flutuantes são, além de suporte, alavancadores de eficiência e saldo energético.

Existem vantagens consideráveis em associar os dois sistemas em questão

para geração de energia. Cazzaniga *et al.* (2019) agrupam estas vantagens, abrangendo sua ligação em rede, balanço de radiação refletida pela superfície terrestre, entre outros fatores. Algumas delas estão dispostas a seguir.

- **Redução de oscilação de ganho energético:** Em termos de saldo energético, usinas solares flutuantes e usinas hidrelétricas têm uma relação de ganho inversa, devido a ciclos naturais. Em épocas de alta incidência de luz solar e calor, normalmente os níveis de água dos reservatórios ficam mais baixos, o que representa uma conseqüente redução de obtenção de energia hídrica. Por outro lado, os módulos fotovoltaicos desempenham máxima aquisição de energia. Considerando a situação inversa, com tempo nublado e maior índice de precipitação, seria um fator desfavorável para geração de energia fotovoltaica, porém favorável para aumento do nível de reservatório de usinas hidrelétricas. Esta compensação mútua estabiliza a continuidade energética, diminuindo as oscilações que ocorreriam se estes dois sistemas não trabalhassem associados um ao outro.
- **Não há ocupação de espaço físico:** Uma vez que os sistemas fotovoltaicos são flutuantes, eles não precisam de espaço físico para serem instalados. Isso representa vantagens geográficas, econômicas e construtivas. Além de não haver a ocupação de áreas naturais ou agrícolas, não há necessidade de construção de elementos estruturais, o que reduz custos de materiais e instalação, além de facilitar a montagem e desmontagem dos módulos flutuantes, sem demandar obras e instalações complexas. Aliado a isso, também reduz riscos de haver perda de material e mão-de-obra, quando há necessidade de manutenção ou desmonte.
- **Resfriamento:** sob a ótica do funcionamento de células fotovoltaicas, enquanto captam luz solar, dependendo da quantidade de calor irradiada, podem perder sua eficiência devido ao aquecimento excessivo. Por serem módulos flutuantes, utilizam a água da própria usina hidrelétrica como arrefecimento, o que melhora muito a eficiência de geração.

2.7 ENERGIA FOTOVOLTAICA

A energia solar possui o maior potencial de geração no campo das energias renováveis, dada a abundância da fonte (MICHELINI, 2020). No que diz respeito à maturidade tecnológica deste sistema, em contradição ao grande potencial de geração, a aplicação dela em escala mundial era, até 2018, inferior a 5% (KHAMISANI, 2018). Dentre os locais onde esta tecnologia é empregada, estão as indústrias, áreas agrícolas e residências. É aplicada também para produzir energia elétrica em módulos e estações espaciais como, por exemplo, a Estação Espacial Internacional, ou ISS (PHYSICS TODAY, 2016). Isso é possível pelo fato de a luz solar ter capacidade de se propagar também no vácuo.

Os sistemas fotovoltaicos são divididos em dois tipos: *on-grid* e *off-grid*. No primeiro, o conjunto gerador está ligado diretamente à rede de distribuição, onde a eletricidade é direcionada para as aplicações no local onde o sistema está instalado. O excedente gerado vai para a concessionária de energia, sendo revertido em créditos (GOMES NETO, 2019). O segundo é referente a uma modalidade onde não há ligação com rede de distribuição e a potência gerada é aplicada no local que o conjunto está instalado. Em momentos de baixa iluminação ou ausência de luz solar, como dias nublados ou período noturno, respectivamente, a eletricidade é armazenada em uma bateria

O sistema *off-grid*, também conhecido como sistema *stand alone*, ou autônomo, é caracterizado pela independência entre o conjunto gerador e a rede de distribuição. Ele é aplicado normalmente em locais onde não é possível prover energia elétrica de forma convencional (LAGUADO-SERRANO *et al.*, 2019). A luz solar incidente é captada por células fotovoltaicas, passa por um inversor, para conversão de corrente contínua em corrente alternada, alimentando diretamente os aparelhos eletroeletrônicos ou iluminação conectados ao sistema (BLUESOL, 2021). A energia excedente passa através de um controlador de carga, que realiza o intermédio entre o que foi captado e o banco de baterias. Este banco é responsável por armazenar a energia, sendo sua carga controlada pelo controlador de carga (PORTAL SOLAR, 2021). Todos estes componentes possuem características e especificações que devem ser dimensionadas de acordo com o porte de sua aplicação, as quais podem ser visualizadas a seguir.

2.7.1 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A produção de energia fotovoltaica tem início com a absorção da luz solar, desempenhada pelos painéis solares. Também conhecidos como módulos fotovoltaicos, são conjuntos de células solares, fabricadas a partir de materiais semicondutores em diferentes camadas. Normalmente estes materiais são constituídos, em sua grande maioria, por silício (Si). Cabe citar que o Si é o segundo elemento presente em maior abundância no planeta Terra (BRUSCHI *et al.*, 2011).

Em geral, as células fotovoltaicas de silício são apresentadas sob três formas constituintes, sendo elas: silício monocristalino (mono-Si), silício policristalino (poly-Si) e silício amorfo (a-Si) (MONTEZANO, 2013). Em ordem de rendimento energético, células mono-Si são as que possuem o maior valor, alcançando até 23% em laboratório, seguidas pelas poly-Si, com uma faixa de 11 a 18%, até as a-Si, com a porcentagem de rendimento de até 13% (JURINIC, 2020). Comercialmente, as células de silício monocristalino possuem custos superiores em comparação com as outras variantes, devido ao alto grau de pureza de sua estrutura cristalina, que é obtida por processos de fabricação meticulosos. Por possuir composição cristalina uniforme, este material apresenta propriedades mecânicas notáveis, como ausência de pontos de tensão ou deslocamento entre contornos de grãos. Em contrapartida, as células de silício policristalino e amorfo são obtidas a partir de processos menos dispendiosos e menos exigentes, o que explica seus valores comerciais mais baixos. Entre elas, as células de silício amorfo são as mais acessíveis.

Historicamente, as células fotovoltaicas foram originadas a partir da descoberta do efeito fotovoltaico, feita por Alexandre-Edmond Becquerel, no ano de 1839 (SOLENERGY SYSTEMS INC, 2018). O experimento consistiu em incidir luz sobre uma solução condutora, onde foi observada a geração de uma diferença de potencial. Somente no ano de 1883 foram fabricados os primeiros dispositivos que viriam a ser denominados células fotovoltaicas (PINHO e GALDINO, 2014). O feito foi realizado por Charles Frits e tinha como material-base o selênio. Em 1953, foram produzidas as primeiras células baseadas em silício, a partir da prévia descoberta 13 anos antes pelo pesquisador Russel Shoemaker Ohl. Ele notou que uma das amostras de silício em que trabalhava apresentava uma trinca, responsável por dividi-la em duas partes, o que ocasionou a separação de um polo carregado

negativamente e outro, positivamente. A principal consequência disso foi a geração de um campo elétrico, a partir da exposição da célula à luz (AMERICAN PHYSICAL SOCIETY, 2009). Este princípio caracteriza o cerne de funcionamento de uma célula fotovoltaica

O funcionamento de uma célula solar tem como base a geração de um campo elétrico por meio de uma diferença de polaridade, induzida a partir da presença de luz. Essa distinção de polaridade é justificada pelo fato de que a célula fotovoltaica é constituída, basicamente, por duas camadas (ambas formadas primariamente de silício). O silício requer 4 elétrons em sua camada de valência para atingir estabilidade. Dessa forma, quando átomos de Si estão ligados entre si, compartilham elétrons, formando uma estrutura baseada em silício. No entanto, para que ela adquira carga positiva ou negativa, é necessário que ocorra a adição de outros elementos juntamente com o silício. Ele é então combinado com boro (B) ou com fósforo (P) em cada uma das camadas, em um processo conhecido como dopagem. Como resultado, uma camada de Si que receba dopagem de fósforo, fica carregada negativamente. O inverso ocorre com a superfície que recebe dopagem de boro, adquirindo carga positiva (FREIRE, 2018). Sendo assim, temos a denominação de N para uma camada negativa e P, para positiva. Uma célula fotovoltaica é caracterizada por ser a união entre estas camadas, onde a denominação para tal é junção P-N (SOLAR CELL CENTRAL, 2023). Nesta junção, há separação entre as superfícies, os elétrons da camada N conseguem transitar de forma a estabilizar os átomos da camada P. Logo, é formada uma região de estabilidade, chamada de *band gap*, ou “banda proibida”. Ela representa uma barreira já consolidada, não permitindo que ocorra o trânsito de elétrons das porções distais da camada N para as porções distais da camada P. É pertinente citar que estas porções ainda permanecem carregadas positiva e negativamente. Para que ocorra o trânsito de elétrons, são necessários meios e energia suficientes. O efeito fotovoltaico consiste no estímulo de elétrons através da exposição da superfície N à luz solar, composta por partículas de energia denominadas fótons. Os elétrons então conseguem ter energia suficiente para avançar para a camada P, onde o meio de condução para tal são placas metálicas presentes em cada uma das superfícies, ligadas entre si a partir de terminais. A camada N é caracterizada por ter uma espessura reduzida, uma vez que deve permitir a passagem de luz até os átomos

negativos mais internos. Essa configuração estabelece um circuito. Dado o fato de os valores de tensão gerada serem muito baixos, os módulos solares operam em conjunto, onde a quantidade necessária é determinada pelo porte da aplicação.

2.7.2 CONTROLADOR DE CARGA

O controlador de carga tem como função principal controlar a tensão de entrada e saída nas baterias, no interesse de manter a vida útil destes dispositivos (ENERGIA TOTAL, 2021). Além disso, ele pode otimizar a taxa de carregamento, minimizando dissipação da energia excedente (NEOSOLAR, 2021). O equipamento é responsável por assegurar que as baterias não carreguem ou descarreguem de maneira excessiva. No primeiro caso, pode ocasionar a destruição das baterias enquanto, no segundo, pode diminuir sua vida útil. Outro fator a ser considerado é que este dispositivo previne que haja uma corrente inversa das baterias para o sistema em si (KHAMISANI, 2018). Atualmente, existem dois tipos de controladores mais comuns disponíveis para comercialização, sendo eles: MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) e PWM (*Pulse Width Modulation*) (TRX SOLAR, 2021). É imprescindível que todo sistema autônomo seja equipado com um controlador, uma vez que necessita de um conjunto de baterias para operar corretamente.

1. MPPT (*Maximum Power Point Tracking*): O controlador de Ponto de Rastreamento de Potência Máxima, em português, possui maior eficiência no que diz respeito ao aproveitamento, obtendo o máximo rendimento possível a partir da captação de energia pelas placas solares, em qualquer ponto dentro da área delas. Devido a este fator, este controlador é mais eficiente do que o PWM, porém é proporcionalmente mais caro. A título de exemplificação, Laguado-Serrano *et al.* (2019) demonstraram que o controlador MPPT apresentou uma eficiência 14,9% maior que do PWM, sob as mesmas condições ambientais e com especificações técnicas semelhantes entre eles.
2. PWM (*Pulse Width Modulation*): Para controlar a carga, o controlador de Modulação de Largura de Pulso lança pulsos de tensão à alta frequência. O aparelho limita a tensão gerada pelas placas, que vai para o banco de baterias através de uma leitura que faz do estado da carga presente nelas.

Em razão disso, existe uma perda de energia considerável, tornando a eficiência deste sistema menor do que a apresentada pelo MPPT. Em contrapartida, o custo deste controlador é mais acessível.

2.7.3 INVERSOR OFF-GRID

Tem como principal função realizar a conversão de corrente contínua proveniente das baterias para corrente alternada, no interesse de providenciar alimentação aos aparelhos que consomem eletricidade (ALTE STORE, 2021). Ele desempenha esta funcionalidade também em momentos em que a alimentação de dispositivos está sendo feita diretamente durante a captação de luz, fornecendo energia na forma de corrente alternada aos dispositivos em funcionamento. Assim como o controlador de carga é intrínseco ao sistema autônomo, o inversor *off-grid* também está diretamente relacionado a esta aplicação, não podendo ser adaptado a um sistema conectado na rede elétrica.

2.7.4 BANCO DE BATERIAS

Em um sistema autônomo, existem duas aplicações distintas: aquelas sem banco de baterias e as que possuem esse componente essencial. O primeiro tipo está relacionado à aplicação da energia solar para alimentar diretamente veículos elétricos e eletroportáteis, conforme mencionado por Gomes Neto (2019). Já a segunda categoria é referente a sistemas que empregam baterias para armazenar energia elétrica, permitindo sua utilização em qualquer período do dia.

Em um sistema fotovoltaico *off-grid*, é necessário incluir uma unidade ou conjunto de baterias para armazenar a carga excedente ou energia não. Para garantir o armazenamento adequado, é crucial dimensionar o sistema seja adequadamente de acordo com o porte e o tipo de aplicação. Essa etapa influencia diretamente na determinação quantidade de baterias que serão instaladas. No caso de sistemas autônomos, as baterias mais utilizadas são as de chumbo-ácido, conhecidas como baterias estacionárias. A figura 1 apresenta um modelo deste tipo.

Figura 1- Bateria de chumbo-ácido



Fonte: Loja Energia Livre, 2021

A bateria de chumbo-ácido foi o primeiro modelo recarregável a ser comercializado (MICHELINI, 2020). Ela é composta por dois polos, sendo um deles de chumbo e o outro de dióxido de chumbo. Ambos estão imersos em uma solução de ácido sulfúrico. Sua aplicação envolve os mais diversos sistemas, tais como fotovoltaicos autônomos, veículos elétricos e sistemas de partida de veículos de combustão interna. Outro modelo muito bem estabelecido no mercado são as baterias de níquel-cádmio (NiCd), presentes no comércio desde meados dos anos 1950. Possui grande emprego em celulares, aparelhos portáteis e ferramentas elétricas. Uma de suas vantagens é suportar alto número de ciclos de carga e descarga, sendo ideais para serem utilizadas muitas vezes. No entanto, este modelo vem sendo gradualmente substituído por baterias à base de íons de lítio, devido ao fato de o cádmio ser um metal altamente tóxico ao meio ambiente e ao corpo humano. A exposição a esse metal pode causar câncer, entre outros problemas relacionados ao seu acúmulo no organismo.

Em contrapartida, as baterias de íons de lítio (Li-Ion) estão substituindo as de NiCd e possuem potencial semelhante às de chumbo-ácido para atender um sistema autônomo. Atualmente, ela corresponde a uma das tecnologias de armazenamento de energia mais aplicadas na atualidade. Seu emprego mais notável, e em larga escala, é em celulares e notebooks. O que justifica sua grande gama de implementações é o fato deste dispositivo ter uma capacidade de carga considerável, aliada ao fornecimento de altos valores de tensão, resultando em uma densidade energética significativa. A título de comparação, este índice de densidade gira em torno de duas vezes mais do que uma bateria de NiCd (BRINGIT, 2021). Células de íon-lítio, também denominadas “pilhas”, quando combinadas, formam as

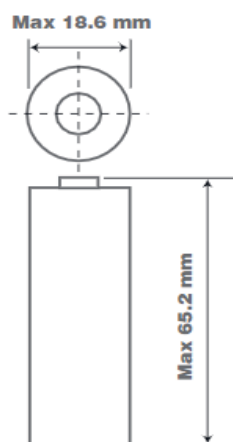
baterias. As mesmas ainda podem formar conjuntos correspondentes a bancos ou agrupamentos de baterias.

A composição de uma célula de íon-lítio corresponde a: cátodo, ânodo, separador com poros e eletrólito. Todos são descritos a seguir.

1. Cátodo: É o polo positivo da célula, e representa o lítio associado a outros materiais, como cobalto (Co), por exemplo.
2. Ânodo: Trata-se do polo negativo da célula, sendo predominantemente composto por grafite.
3. Separador com poros: Funciona de forma que permite a passagem dos íons em seu interior, mas ao mesmo tempo segregando o cátodo e o ânodo no interior da célula.
4. Eletrólito: É um composto que contém sais de lítio, e serve como caminho para transferência dos íons.

No que se refere aos modelos de bateria deste tipo, o mais econômico em termos da razão custo por carga armazenada, são aqueles compostos por células cilíndricas 18650 (MICHELINI, 2020). Esta numeração corresponde às dimensões da célula, onde 18 é seu diâmetro e 65 é o comprimento, ambos em milímetros, como mostrado na figura 2.

Figura 2- Dimensões da célula 18650



Fonte: Alldatasheet (2022, p.1)

Com relação à aplicação, uma das mais comuns é encontrada nas baterias de

notebook, compostas por 6 a 9 unidades 18650. Quanto maior for a quantidade de células dentro de um conjunto, maior é a capacidade de armazenamento, geralmente medida em mAh. Conseqüentemente, a duração da bateria será maior. A figura 3 mostra as especificações extraídas do *datasheet* de uma célula NCR 18650 Panasonic. A título de exemplificação, uma bateria Dell Vostro 3550 tem uma capacidade de 4400 mAh.

Figura 3- Especificações da célula NCR 18650

Specifications

Capacity: 2.9Ah Typical
(Charge: CVCC, 4.2V, max.
1925mA, 50mA cutoff, 25°C)
(Discharge: CC, 550mA, 2.5V
cutoff, 25°C)

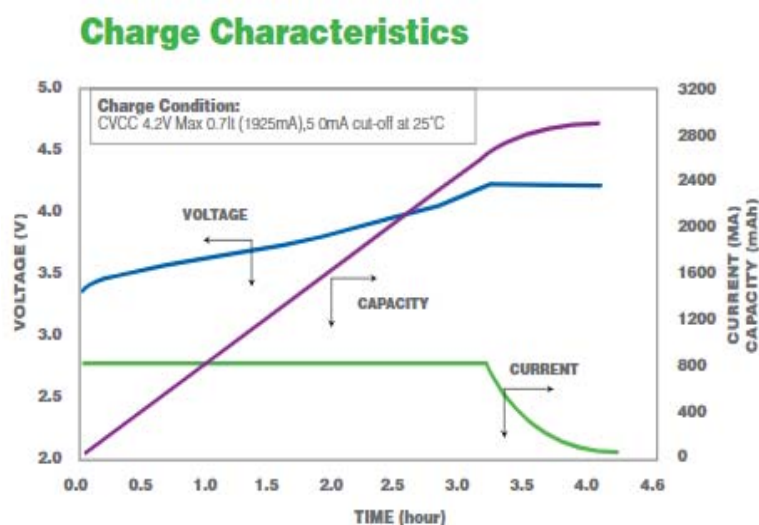
Nominal Voltage: 3.6V

Weight: Approximately 44.5g

Fonte: Alldatasheet (2022, p.1)

Um aspecto importante a ser considerado é a capacidade de descarga. Quanto maior for o valor dela, mais energia por unidade de tempo a bateria fornecerá ao dispositivo a ser alimentado. As figuras 4 e 5 mostram, respectivamente, os gráficos de carga e descarga da NCR 18650.

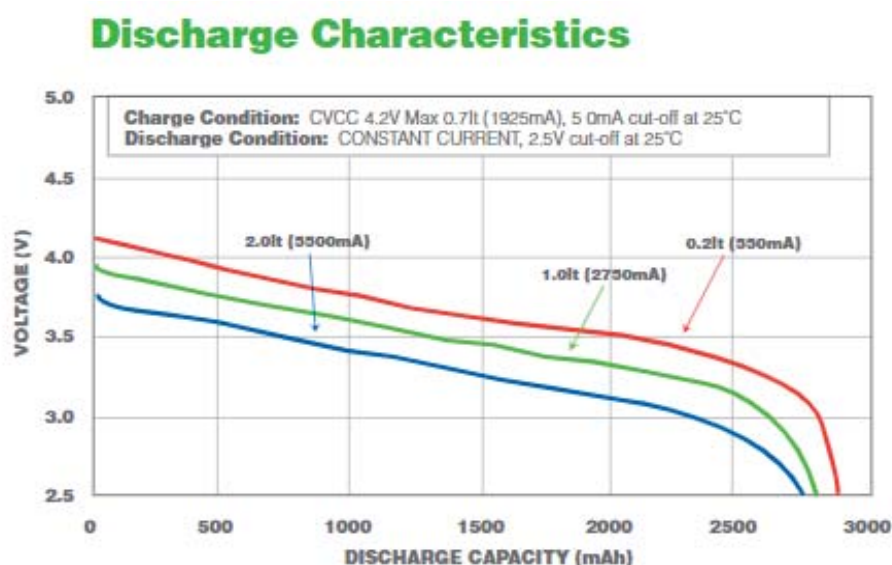
Figura 4- Características de carga



Fonte: Alldatasheet (2022, p.1)

Na figura 4, é possível observar que a capacidade de carga é crescente ao longo do tempo e atinge seu valor máximo em um período de 4 horas, com valor em torno de 2900 mAh. Esse crescimento começa a se estabilizar entre 3 horas e 3,5 horas, com uma capacidade correspondente a 2500 mAh. Até antes deste ponto, a corrente se mantém constante no valor de 800 mA e começa a decair conforme o valor da capacidade começa a se estabilizar.

Figura 5 - Características de descarga



Fonte: Alldatasheet (2022, p.1)

A figura 5 mostra a relação entre valores de voltagem (tensão), em volts, e a capacidade de descarga, em mAh. É possível observar que, à medida que a corrente de descarga aumenta, a tensão diminui. Isso é evidenciado pelas três curvas do gráfico, representadas em vermelho, verde e azul. Na curva em vermelho, a corrente de descarga é de 550 mA correspondendo ao maior valor de tensão dentro do gráfico, indicando que leva mais tempo para que a célula seja completamente descarregada nessa condição. Em verde, é representada uma corrente de 2750 mA, situada em uma faixa intermediária tanto em termos de tensão quanto de capacidade de descarga. Já em azul, tem-se a maior corrente de descarga aplicada, de 5500 mA, resultando na menor tensão nesta região do gráfico. Neste cenário, a célula sofre uma descarga mais rapidamente.

Células de íons de lítio possuem diferentes elementos químicos associados ao lítio. Estes são correspondentes ao cátodo das baterias, sendo cada tipo relativo

a um grupo específico de aplicações, possuindo vantagens e desvantagens distintas. Alguns exemplos desses tipos são: óxido de lítio-cobalto (LCO), óxido de lítio-manganês (LMO), óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto (NMC), óxido de lítio-níquel-cobalto-alumínio (NCA), fosfato de lítio-ferro (NFP) e titanato de lítio (LTO).

1. Óxido de lítio-cobalto (LCO): aplicada em dispositivos como celulares, notebooks e tablets;
2. Óxido de lítio-manganês (LMO): utilizado em equipamentos médicos e ferramentas;
3. Óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto (NMC): comumente encontrado em bicicletas elétricas (*e-bikes*), e equipamentos industriais;
4. Óxido de lítio-níquel-cobalto-alumínio (NCA): é utilizado em veículos Tesla, bem como em equipamentos industriais;
5. Fosfato de lítio-ferro (NFP): aplicado em motores de arranque automotivos.
6. Titanato de lítio (LTO): aplicado em iluminação pública fotovoltaica, veículos elétricos da Mitsubishi e Honda, além de *nobreaks*.

Essas aplicações destacam como cada tipo de célula ou bateria de íons de lítio é utilizado em diferentes setores, com base em suas características específicas, proporcionando soluções adequadas para diversos fins.

A figura 6 mostra uma tabela comparativa dos modelos de baterias de íon lítio.

Figura 6 - Tabela comparativa dos tipos de baterias de íon lítio

Tipo de Bateria de Li-Ion	LCO	LMO	NMC	LFP	NCA	LTO
Tensão Nominal (V)	3,6	3,7	3,6	3,2	3,6	2,4
Tensão Máxima na Carga (V)	4,2	4,2	4,2	3,65	4,2	2,85
Tensão Mínima na Descarga (V)	3	3	3	2,5	3	1,8
Tensão Mínima	2,5	2,5	2,5	2	2,5	1,5
Energia Específica (Wh/Kg)	175	125	185	105	230	75
Taxa de Carga Padrão (Taxa C)	1	1	1	1	1	1
Tempo de Carga Rápida (horas)	3	3	3	3	3	3
Taxa de Descarga Máx. (Taxa C)	1	10	2	25	1	10
Número de Ciclos - Médio	700	500	1500	1500	500	5000

Fonte: Michelin (2020, p.94)

Apesar de serem predominantemente utilizadas, as células de íon lítio possuem vantagens e desvantagens. Entre seus pontos positivos, destacam-se:

- Alta densidade energética;
- Baixa taxa de autodescarga baixa, resultando em menor perda energética quando não estão em uso, especialmente em comparação com baterias de níquel-cádmio (NiCd);
- Por não possuírem efeitos de memória, não é necessário realizar descargas periódicas para manutenção;
- Menor impacto ambiental em comparação com as baterias de níquel-cádmio, devido à toxicidade do cádmio.

Em contrapartida, os contras da bateria de íon-lítio incluem:

- Necessidade de um circuito de proteção para evitar sobrecarga;
- Envelhecimento relativamente rápido;
- Custo de fabricação elevado;

- Danos à pilha ou abertura geram alta temperatura podem tornar o dispositivo inflamável, com possibilidade de causar danos físicos.

Em vista dos prós e contras das baterias em questão, este trabalho tem como objetivo levantar um estudo em torno da reutilização de células 18650, no interesse de dimensionar um banco de baterias capaz de armazenar energia suficiente para uso em uma residência, a partir da aplicação de um sistema fotovoltaico autônomo. Isso proporciona economia tanto na aquisição das células quanto na precificação geral do sistema.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

À luz da importância de preservação de recursos naturais, é evidente a necessidade pela busca de métodos de geração de energia através de fontes renováveis, enfatizando sua contribuição na manutenção e cuidados com o meio ambiente. A energia fotovoltaica por si só denota um avanço significativo no uso de uma fonte renovável. O estudo envolvido neste trabalho tinha como principal objetivo unir o uso destes dois métodos por meio de uma análise que levantasse os meios que viabilizassem a reutilização de baterias de notebook para armazenamento da energia gerada por um sistema off-grid residencial. O levantamento teórico através de bibliografias, artigos e materiais disponíveis na internet permitiu elucidar, fundamentar e direcionar este trabalho de maneira a atender o objetivo proposto. Especificamente sobre as células 18650, o material teórico encontrado era esparsos e não havia formalização padronizada. Além disso, como o estudo envolveu a pesquisa em torno da montagem e nomenclatura de uma bateria utilizando estas células, as informações sobre tal procedimento e trabalhos já realizados disponíveis na web eram de caráter prático, com pouca fundamentação teórica registrada, além de escasso material de ordem científica.

Apesar das dificuldades relativas ao material teórico em torno das células 18650 e montagem de baterias utilizando-as, os pontos propostos no objetivo específico foram atendidos, constatando que o sistema off-grid é viável para células reutilizadas. Isso foi possível devido à aquisição das baterias de notebook, com extração de 777 unidades dentro delas, o que permitiu a disponibilidade considerável de recursos materiais para experimentação. A triagem inicial, medições de quantidade de carga, resistência dinâmica e tempo de teste possibilitaram selecionar para reutilização mais da metade do lote adquirido (51%), o que indica que o descarte destas células pode ser reduzido de maneira acentuada sob determinadas condições de escolha estabelecidas. Além disso, com o dimensionamento teórico da bateria embasando-se em conceitos da Física já estabelecidos no estado-da-arte, foi possível definir a formalização e organização de todos os parâmetros que se encontravam esparsos ou empíricos na internet. Isso permitiu alcançar resultados satisfatórios sob o ponto de vista da construtividade da bateria. Outro aspecto abordado foi a viabilidade econômica, que resultou em um valor de um sistema off-grid com células reaproveitadas no valor total de R\$

18864,81, com Retorno de Investimento (ROI) de 8 anos, em comparação com um sistema com células novas custando R\$ 60838,65 com ROI de 27 anos. Um ponto importante é que o tempo de vida útil de um sistema fotovoltaico é de 25 anos. Com isso, tem-se uma evidência contundente, considerando a vertente técnico-econômica, de que o sistema off-grid é viável. O maior custo em torno dos processos de experimentação e montagem realizados foi da mão de obra.

Em conclusão, este estudo atendeu os objetivos propostos e permitiu estabelecer a formalização de conceitos antes, em grande parte, difundidos de maneira empírica em materiais diversos. É esperado que este trabalho contribua para outros (as) autores (as) em suas pesquisas e torne-se relevante neste campo de estudo. Um ponto a ser abordado em pesquisas futuras é a análise da durabilidade das baterias. Não foi, de fato, construído um protótipo que permitisse realizar tal análise, nem tampouco aplicar de maneira prática em um sistema off-grid residencial. No entanto, foi construído um protótipo já operacional que alimenta um veículo elétrico de três rodas, o que caracteriza mais um campo onde este trabalho pode ser aplicado. Por fim, levando em consideração a vertente ambiental, o presente documento pode servir como elemento alavancador em pesquisas que fomentem métodos de preservação de recursos e busca por fontes renováveis de energia dentro da Ciência. Esta dissertação resultou em um artigo, a ser submetido para publicação em revista especializada. Tal artigo está em anexo e suas conclusões podem se somar, com eventuais superposições, às conclusões desta dissertação.

REFERÊNCIAS

ALAGO, I. **Descarte das baterias de lítio: entenda sua importância e como fazer.** Chemical Risk. 22 out. 2019. Disponível em: <https://www.chemicalrisk.com.br/descarte-das-baterias-de-litio/>. Acesso em: 28 dez. 2021.

ALLDATASHEET. **NCR18650 Datasheet (PDF) - Panasonic Battery Group.** 2022. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/597041/PANASONICBATTERY/NCR18650.html>. Acesso em: 03 dez. 2022.

ALTE STORE. **The Role of an Inverter in a Solar Electric System.** 2021. Disponível em: <https://www.altestore.com/diy-solar-resources/the-role-of-an-inverter-in-a-solar-electric-system/>. Acesso em: 26 dez. 2021.

ALUGAGERA. **Vantagens e Desvantagens da Energia das Marés.** 2023. Disponível em: <https://alugagera.com.br/noticias/energia-eletrica-mare-oceano>. Acesso em: 27 jan. 2023.

AMERICAN PHYSICAL SOCIETY. **April 25, 1954: Bell Labs Demonstrates the First Practical Silicon Solar Cell.** 2023. Disponível em: <https://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm>. Acesso em: 16 jan. 2023.

BLUESOL. **Inversor Solar Fotovoltaico: o que é, como funciona e tipos.** 2021. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/inversor-fotovoltaico-o-que-e-como-funciona/#:~:text=O%20inversor%20solar%20off%20grid%2C%20ou%20inversor%20off%20grid%2C%20%C3%A9,el%C3%A9trica%20diretamente%20aos%20aparelhos%20consumidores>. Acesso em: 28 dez. 2021.

BRASIL, gov.br. **Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz energética brasileira.** 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira>. Acesso em: 16 jan. 2023.

BRUSCHI, D.L.; MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I.; *et al.* Desenvolvimento de células solares em silício tipo n com emissor formado por Boro. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 16, n. 3, p. 776–787, 2011.

BRINGIT. **Baterias para notebook: curiosidades e cuidados.** 2021. Disponível em: <https://www.bringit.com.br/blog/dicas-e-tutoriais-para-notebook/bateria-para-notebook-curiosidades-e-cuidados/>. Acesso em: 28 dez. 2021.

CASTRO, R. M. **Introdução à Energia Eólica.** Universidade Técnica de Lisboa. 4. ed. Lisboa: 2009. Disponível em: http://ead2.ctgas.com.br/a_rquivos/Pos_Tecnico/Especializacao_Energia_Eolica_Turmall_2013/Medicao_Anemometrica/Material%20de%20Consulta/Livros/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20a%20Energia%20E%C3%B3lica.pdf. Acesso em: 14 jan. 2023.

CAZZANIGA, R. *et al.* Integration of PV floating with hydroelectric power plants. **Heliyon**, 5, e01918, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01918>. Acesso em: 07 fev. 2023.

D'AQUINO, C. A.; CREPALDI, L. B. (org.). **Apostila da disciplina EES7370: Energia Eólica. Araranguá: [s.l]: 2021.** Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/234229/Apostila%20Energia%20E%3%B3lica%202021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 03 nov. 2021.

DUTRA, R. Energia eólica – Princípios e Tecnologia. **Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio S. de Brito (CRESESB)**. 2023. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf. Acesso em: 10 jan. 2023.

ENERGIA LIVRE. **Kit Off grid 3x Painéis 340W + 4x Baterias 240Ah + MPPT 40A.** 2021. Disponível em: <https://www.lojaenergialivre.com.br/energia-solar-fotovoltaica/kits/kit-off-grid/kit-offgrid-3x-painel-solar-320w-4x-baterias-185ah-mppt40a>. Acesso em: 20 dez. 2021.

ENERGIA TOTAL. **Controladores de Carga, para que servem?** 2017. Disponível em: <https://www.energiatotal.com.br/controladores-de-carga-para-que-servem>. Acesso em: 23 dez. 2021.

FREIRE, F. Como Funciona a Célula Fotovoltaica. **Share Energy**. 23 fev. 2018. Disponível em: <https://www.shareenergy.com.br/como-funciona-celula-fotovoltaica/> Acesso em: 12 jan. 2023.

GALDINO, M. A.; PINHO, J.T. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 16 jan. 2023.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e Energia. **Química Nova** 32.3 (2009): 582-87. Web. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jqn/a/L6Pd3ZKdPqc4pZ4TQn5RyQy/?lang=pt>. Acesso em: 12 jul. 2023.

GOMES NETO, L. **Estudo do Sistema Fotovoltaico On-Grid e Off-Grid.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade de Araraquara, Araraquara, 2019.

GUITARRARA, P. Biomassa. **Brasil Escola**. 2023. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/biomassa.htm>. Acesso em 15 jan. 2023.

JURINIC, F. **Estudo para Melhoria na Performance e Eficiência de Placas Fotovoltaicas: Através de Um Sistema Combinado de Inclinação e Resfriamento.** 2020. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2020.

KHAMISANI, A. **Design Methodology of Off-Grid PV Solar Powered System (A Case Study of Solar Powered Bus Shelter).** 2018. Disponível em:

https://www.eiu.edu/energy/Design%20Methodology%20of%20Off-Grid%20PV%20Solar%20Powered%20System_5_1_2018.pdf. Acesso em: 06 jan. 2022.

LAGUADO–SERRANO, M. A. et al. Performance comparison between PWM and MPPT charge controllers. **Scientia et technica**, v. 24, n. 1, p. 6-11, 2019.

MALAR, J. P. **Entenda como as ondas e marés podem gerar energia no Brasil**. CNN Brasil. 10 out. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/entenda-como-ondas-e-mares-podem-gerar-energia-no-brasil/>. Acesso em: 23 jan. 2023.

MICHELINI, A. **Baterias Recarregáveis para Equipamentos Portáteis**. 2017. Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/resources/downloads/ebookbateriasrecarregaveis2.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2022.

MONTEZANO, B. **As Energias Solar e Eólica no Brasil**. 2013. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/casasolar/casasolar2013.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2023.

MOREAU, R. A Importância da Energia nas Nossas Vidas e a Interdependência entre a Economia e a Energia no País. **O Alto Taquari**. 2013. Disponível em: <https://www.oaltotaquari.com.br/porta/2013/03/a-importancia-da-energia-nas-nossas-vidas-e-a-interdependencia-entre-a-economia-e-a-energia-do-pais/#:~:text=Com%20a%20energia%20el%C3%A9trica%20obtemos,do%20banho%20ou%20outras%20finalidades>. Acesso em: 20 ago. 2022.

NEOSOLAR. **Controladores PWM e MPPT**. 2021. Disponível em: [https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/controladores-pwm-e-mppt#:~:text=Os%20controladores%20PWM%20\(Pulse%20Width,de%20duas%20vazes%20mais%20caros](https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/controladores-pwm-e-mppt#:~:text=Os%20controladores%20PWM%20(Pulse%20Width,de%20duas%20vazes%20mais%20caros). Acesso em: 26 dez. 2021.

PHYSICS TODAY. **Edmond Becquerel**. 2023. Disponível em: <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/pt.5.031182/full/>. Acesso em: 11 jan. 2023.

PORTAL SOLAR. **Dimensionamento de sistema solar autônomo off-grid**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/dimensionamento-de-sistema-solar-autonomo-off-grid>. Acesso em: 27 dez. 2021.

REIS, P. **Energia Eólica**. Portal Energia. 10 fev. 2019. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/energia-eolica/>. Acesso em: 10 jan. 2023.

SOLENERGY SYSTEMS INC. **Edmond Becquerel: The Man Behind Solar Panels**. 2023. Disponível em: <https://solenergy.com.ph/solar-panel-philippines-edmond-becquerel/>. Acesso em: 11 jan. 2023.

SOLAR CELL CENTRAL. **P/N Junctions & Band Gaps**. 2023. Disponível em: http://solarcellcentral.com/junction_page.html. Acesso em: 20 jan. 2023

TERCIOTE, R. A energia eólica e o meio ambiente. In Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002, Campinas (SP) [online]. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3427167/mod_resource/content/1/e%C3%B3lica%201.pdf. Acesso em: 10 jan. 2023.

TRX SOLAR. **Controladores de carga MPPT x PWM**. 2021. Disponível em: <https://loja.trxsolar.com/loja/noticia.php?loja=655927&id=53>. Acesso em: 26 dez. 2021.