

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**JEFFERSON CAJÁ SANTOS SOBRINHO**

**COMPENSAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA POR SISTEMA DE  
ARMAZENAMENTO**

**MEDIANEIRA**

**2022**

**JEFFERSON CAJÁ SANTOS SOBRINHO**

**COMPENSAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA POR SISTEMA DE  
ARMAZENAMENTO**

**Energy consumption compensation by storage system**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Marcos Fischborn

Coorientador: Yuri Ferruzzi

**MEDIANEIRA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**JEFFERSON CAJÁ SANTOS SOBRINHO**

**COMPENSAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA POR SISTEMA DE  
ARMAZENAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado  
como requisito para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 21/junho/2022

---

Marcos Fischborn  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Yuri Ferruzzi  
Mestrado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Estor Gnoatto  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Evandro André Konopatzki  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**MEDIANEIRA**

**2022**

## RESUMO

Neste trabalho, o problema do alto custo financeiro relativo ao consumo de energia durante o período de ponta é abordado com o objetivo de mitigar estes custos por meio do uso de energias renováveis. Inicialmente é feito um levantamento do quanto o consumo de energia durante o período de ponta na Universidade Tecnológica Federal do Paraná afeta no faturamento de energia durante o período de um ano. Após este levantamento conclui-se que o consumo de energia durante o período de ponta corresponde a um terço do faturamento da conta de energia elétrica. Portanto, o objetivo deste trabalho é dimensionar os elementos de um sistema de geração e armazenamento de energia. Este sistema é composto por painéis fotovoltaicos, baterias, controladores de carga e inversor de frequência. Assim, este sistema é projetado para fornecer energia ao campus durante o período de ponta. Os resultados deste trabalho mostram que o uso de baterias de lítio eleva o grau de confiabilidade do sistema de armazenamento, em contrapartida os custos podem levar o projeto a ser inviável. De acordo com o dimensionamento realizado neste trabalho, são necessários 300 painéis, 45 inversores, 15 controladores de carga e 540 Baterias para atender as especificações do sistema estudado. Os resultados permitiram concluir que a metodologia utilizada neste trabalho para conjecturar este sistema pode ser aplicada com sucesso para realizar o dimensionamento dos principais elementos do sistema.

**Palavras-chave:** energias renováveis; energia solar; sistema de energia fotovoltaica.

## ABSTRACT

In this work, the problem of the high financial cost related to energy consumption during the peak period is addressed with the objective of mitigating these costs through the use of renewable energies. Initially, a survey is made of how much energy consumption during the peak period at the Federal Technological University of Paraná affects energy billing during the period of one year. After this survey, it is concluded that energy consumption during the peak period corresponds to one third of the billing of the electricity bill. Therefore, the objective of this work is to dimension the elements of an energy generation and storage system. This system consists of photovoltaic panels, batteries, charge controllers and a frequency inverter. Thus, this system is designed to provide power to the campus during peak period. The results of this work show that the use of lithium batteries increases the degree of reliability of the storage system, on the other hand, the costs can make the project unfeasible. According to the design performed in this work, 300 panels, 45 inverters, 15 charge controllers and 540 Batteries are needed to meet the specifications of the studied system. The results allowed us to conclude that the methodology used in this work to conjecture this system can be successfully applied to carry out the design of the main elements of the system.

**Keywords:** renewable energies; solar energy; photovoltaic energy system.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 - Gráfico da curva de carga da UTFPR-MD em um dia de verão e outro de inverno.....	11
Gráfico 2 - Eficiência de diferentes baterias em função taxa C em 25° C.....	18
Gráfico 3 - Ciclo de vida da bateria baseado na profundidade de descarga, com corrente de descarga de 0,5C.....	18
Gráfico 4 - Perfil mensal da demanda de energia durante o período de ponta.....	32
Gráfico 5 - Perfil mensal do consumo de energia na ponta.....	33
Gráfico 6 - Influência do consumo de ponta no faturamento de energia da UTFPR .....	33
Figura 1 - Possibilidades de serviços prestados por baterias.....	9
Figura 2 - Processo de conversão da célula fotovoltaica.....	14
Figura 3 - Processo hierarquizado de agrupamento: célula → módulo → painel fotovoltaico .....	15
Figura 4 - Tecnologias para armazenamento de energias.....	16
Figura 5 - Representação do inversor .....	20
Figura 6 - Sistema fotovoltaico híbrido.....	21
Figura 7 - Sistema fotovoltaico híbrido alternativo.....	21
Figura 8 - Controlador carga bateria solar Victron.....	36
Figura 9 - Bateria de lítio usada no dimensionamento .....	36
Figura 10 - Inversor de frequência off-grid Victron.....	38
Figura 11 - Diagrama de blocos do sistema de geração e armazenamento de energia.....	38
Figura 12 - Esquema unifilar simplificado do projeto de geração e armazenamento de energia .....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Preço e tarifação para o sub grupo A4 .....	12
Tabela 2 - Feriados nacionais. ....	12
Tabela 3 - Tarifa COPEL .....	32
Tabela 4 - Elementos e dispositivos do projeto .....	38

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>10</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo específicos .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Curva de carga.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2</b>	<b>Modalidade tarifária do subgrupo a4.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3</b>	<b>Geração distribuída.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4</b>	<b>Radiação solar.....</b>	<b>13</b>
<b>2.5</b>	<b>Efeito fotovoltaico.....</b>	<b>14</b>
<b>2.6</b>	<b>Célula e módulo fotovoltaicos.....</b>	<b>14</b>
<b>2.7</b>	<b>Sistemas de armazenamento de energia.....</b>	<b>15</b>
2.7.1	Baterias eletroquímicas .....	16
2.7.2	Comparação de baterias de chumbo-ácido e Lítion-ion para armazenamento estacionário em sistemas de energia fora da rede.....	17
<u>2.7.2.1</u>	<u>Eficiência .....</u>	<u>17</u>
<u>2.7.2.2</u>	<u>Ciclo de vida .....</u>	<u>18</u>
2.7.3	Estudo comparativo dos tipos de baterias de lítio .....	19
<b>2.8</b>	<b>Conversores CC/CA.....</b>	<b>20</b>
<b>2.9</b>	<b>Sistemas fotovoltaicos híbridos conectados à rede .....</b>	<b>21</b>
<b>2.10</b>	<b>Controlador de carga .....</b>	<b>22</b>
<b>2.11</b>	<b>Metodologia para projetar um gerador fotovoltaico com armazenamento em baterias.....</b>	<b>22</b>
<b>2.12</b>	<b>Dados da Irradiação Solar.....</b>	<b>23</b>
<b>2.13</b>	<b>Dados do consumo e demanda .....</b>	<b>23</b>
<b>2.14</b>	<b>Escolha do módulo fotovoltaico, controlador, bateria e inversor .....</b>	<b>23</b>
<b>2.15</b>	<b>Dimensionamento da Usina Solar .....</b>	<b>24</b>
<b>2.16</b>	<b>Dimensionamento do Sistema de Proteção .....</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Classificação da pesquisa.....</b>	<b>29</b>
3.1.1	Quanto a natureza.....	29
3.1.2	Quanto métodos ou abordagem.....	29
3.1.3	Quanto aos objetivos .....	29
3.1.4	Quanto aos procedimentos.....	30
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>31</b>
<b>4.1</b>	<b>Perfil de consumo de energia do campus medianeira da UTFPR .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2</b>	<b>Dimensionamento do sistema <i>Off-Grid</i>.....</b>	<b>33</b>
4.2.1	Levantamento de demanda de energia elétrica (carga) .....	34
4.2.2	Dimensionamento do arranjo fotovoltaico (painéis solares).....	34
4.2.3	Dimensionamento do controlador de carga.....	35
4.2.4	Dimensionamento do banco de bateria .....	36
4.2.5	Dimensionamento do inversor.....	37
4.2.6	Diagrama de blocos e esquema do projeto .....	38
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>42</b>

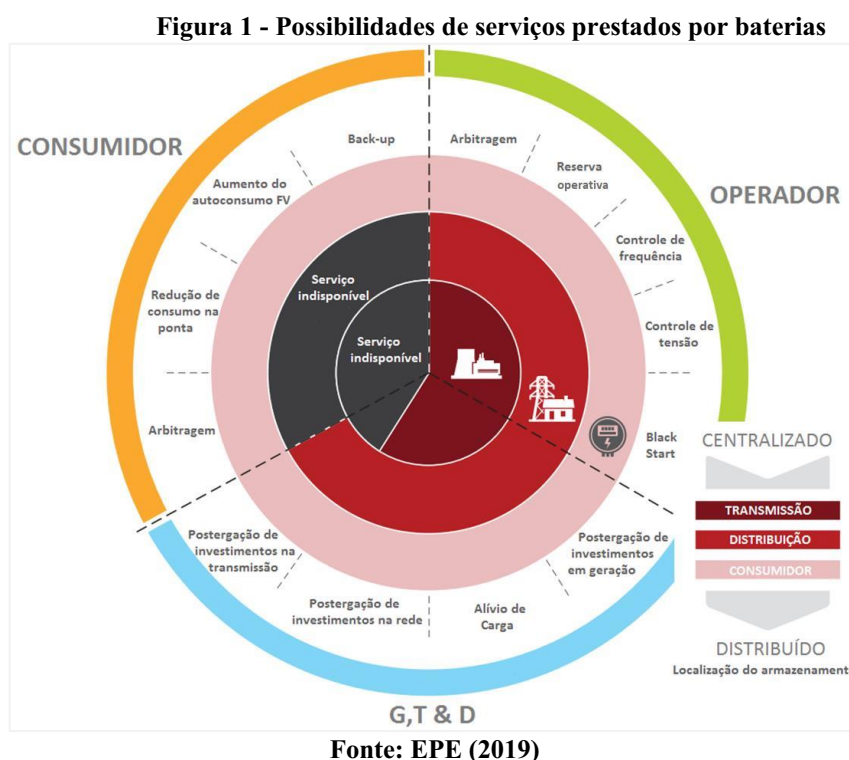


## 1 INTRODUÇÃO

A participação das fontes renováveis na produção de energia elétrica no mundo está em constante crescimento, mas há um problema a ser solucionado que consiste em gerenciar a geração e o consumo de energia de forma inteligente com a inserção de tecnologias de armazenamento.

A fim de otimizar o uso de energia por consumidores de geração distribuída a Copel (Companhia Paranaense de Energia) faz parceria com a UFSM (Universidade Federal de Santa Maria-RS) e NHS Sistemas de Energia, onde vem desenvolvendo um projeto de pesquisa, que visa obter um sistema que permita o uso da energia solar produzida e armazenar o excedente em baterias. (Araújo, 2020)

As baterias vêm trazendo distintas possibilidades de uso, permitindo que diversos serviços possam fazer uso desta tecnologia. Na Figura (1), podem-se ver as possíveis aplicações das baterias. (EPE, 2019)



A publicação do Plano Decenal de Energia PDE 2024 “indicava ser necessário contratar um montante anual igual a 500 MW em 2021, para atender o horário de ponta de alguns dias no ano, a fim de que os riscos de déficit fossem inferiores a 5%.” (EPE, 2019, p. 6).

Tendo em vista a crescente inserção das fontes renováveis com o armazenamento de energia no setor elétrico e o preço da tarifa de ponto ser de 3 a 4 vezes mais cara que a tarifa

fora de ponta, faz-se necessário estudos voltados ao armazenamento de eletricidade em longo prazo, e as baterias podem solucionar esse problema.

Partindo desse pressuposto, o principal objetivo deste trabalho será a redução do consumo na ponta da Universidade Tecnológica Federal do Paraná no campus Medianeira com a proposta de um estudo para o dimensionamento de uma Usina Solar com armazenamento em baterias de lítio.

### **1.1 Objetivo geral**

Realizar um estudo para compensar o consumo de energia elétrica no horário de ponta com um gerador fotovoltaico e armazenamento de energia em baterias de lítio na Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Medianeira no período pré-pandêmico.

### **1.2 Objetivo específicos**

- Estimar a quantidade de módulos fotovoltaicos;
- Estimar a quantidade a potência do controlador de carga;
- Dimensionar o sistema de armazenamento;
- Dimensionar o inversor de frequência.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Curva de carga

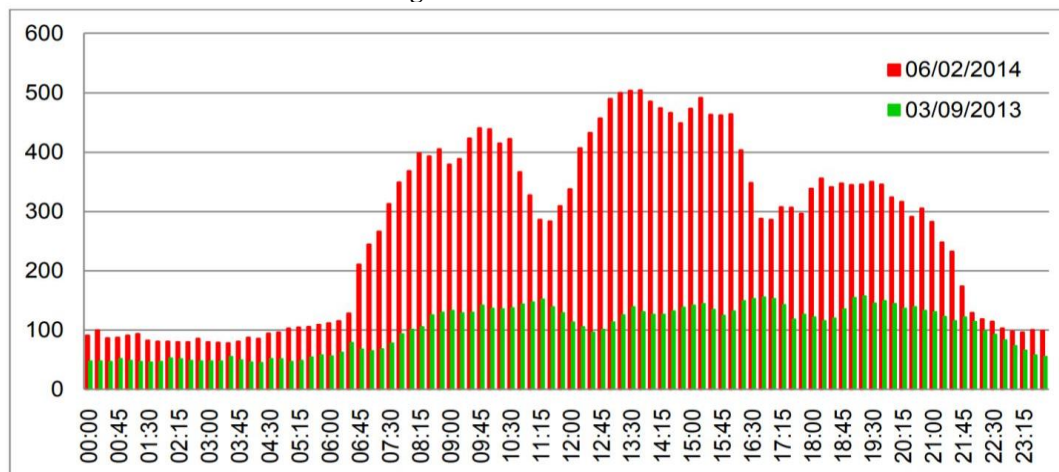
A curva de carga representa a injeção da potência elétrica solicitada por uma unidade consumidora durante um período de tempo. Lima (2021, P. 1) estabelece que: “A curva de carga tem o objetivo de demonstrar o comportamento da carga ou o consumo de potência (ativa/reactiva/ aparente) de uma carga variável suprida por uma fonte durante um período de análise e, portanto, em uma base de tempo.”

A curva de carga é comumente analisada nos seguintes períodos: dia, semana, mês, trimestre, semestre ou ano. De acordo com Lima (2021), a análise da curva pode ser útil para avaliar as características de um ponto de conexão de carga em determinada instalação e no planejamento tanto para as distribuidoras como para os consumidores ou usuários da energia.

De acordo com os estudos feitos por Becker (2014), foi possível analisar o comportamento da curva de demanda com integração de 15 minutos (1/4 de hora) entre uma amostra e outra em um dia de verão e outro de inverno da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

No Gráfico (1) observa-se a curva de carga em um dia de verão (quinta-feira 06/02/2014) e em um dia de inverno (terça-feira 03/09/2013).

**Gráfico 1 - Gráfico da curva de carga da UTFPR-MD em um dia de verão e outro de inverno**



Fonte: BECKER (2014)

## 2.2 Modalidade tarifária do subgrupo a4

A modalidade tarifária corresponde ao grupo que melhor a empresa se enquadra para poder ter acesso a rede da concessionária, levando em conta a disponibilidade, tensão e demanda contratada.

O Subgrupo A4 é caracterizado por uma unidade consumidora pertencente ao grupo A, sendo este atendido com tensão de 2,3 KV a 25 KV. (ANEEL, 2010)

A tarifa dos consumidores pertencentes ao grupo A é constituída por preços aplicáveis no consumo de energia elétrica ativa (R\$/kWh) e à demanda faturável (R\$/kWh). Um segundo fator que altera o preço é o horário de ponta e fora de ponta. (COPEL, 2019). Na Tabela (1) é possível ver a diferença dos preços.

**Tabela 1 - Preço e tarifação para o sub grupo A4**

<b>Grandeza</b>	<b>Tarifas</b>	
Consumo fora de ponta [kWh]	R\$	0,518538
Consumo de ponta [kWh]	R\$	1,966941
Demanda [kW]	R\$	21,014168
Demanda isenta de ICMS [kW]	R\$	17,07
Ultrapassagem de demanda [kW]	R\$	42,03

**Fonte: Adaptado COPEL (2019)**

O posto tarifário de ponta ou horário de ponta, é composto por três horas diárias consecutivas definidas pela distribuidora. No caso da Copel, de 2ª a 6ª feira das 18h às 21h, com exceções os sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, Corpus Christi e os seguintes feriados da Tabela (2). (COPEL, 2019; BRASIL, sem data)

**Tabela 2 - Feriados nacionais.**

<b>Dia e mês</b>	<b>Feriados nacionais</b>
01 de janeiro	Confraternização Universal
21 de abril	Tiradentes
01 de maio	Dia do trabalho
07 de setembro	Independência
12 de outubro	Nossa Senhora Aparecida
02 de novembro	Finados
15 de novembro	Proclamação da República
25 de dezembro	Natal

**Fonte: Adaptado Brasil (s.d.)**

## 2.3 Geração distribuída

O termo Geração Distribuída (GD) serve para designar a geração de energia elétrica próximo da unidade consumidora de energia, com isso possibilitando diversificar a matriz energética do país e postergando futuras ampliações da rede de transmissão/distribuição e de geração. (Junior *et al.*, 2008)

No Quadro (1), são estabelecidos alguns critérios para o consumidor ser caracterizado como GD.

**Quadro 1 - Principais pontos de alteração da RN nº 482/2012 com a publicação da RN nº 687/2015.**

	RN nº 482/2012	RN nº 687/2015
Microgeração distribuída	Central geradora com potência instalada inferior ou igual a 100 KW.	Central geradora com potência instalada inferior ou igual a 75 KW.
Minigerção distribuída	Central geradora com potência instalada superior a 100 KW e menor ou igual a 1 MW.	Central geradora com potência instalada superior a 75 KW e menor ou igual a 3 MW (fontes hídricas) ou menor ou igual a 5 MW (cogeração qualificada, ou para as demais fontes renováveis).
Tipos de fontes conectadas na rede de distribuição na Unidade Consumidora (UC)	Fontes hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada.	Cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica.

**Fonte: Adaptado de Junior *et al* (2008)**

## 2.4 Radiação solar

A radiação solar é essencial para manutenção da vida no Planeta Terra, sendo essa, uma fonte energética inesgotável, que pode ser utilizada para aquecimento de líquidos ou geração de energia elétrica. Anualmente chega até a atmosfera terrestre  $1,5 \times 10^{10}$  kWh de energia do Sol. (CRESESB, 2008)

Segundo Filho (2019, p. 10) “a intensidade da radiação solar, denominada de irradiância ( $W/m^2$ ), é definida pela densidade de potência que incide sobre uma superfície plana perpendicular aos raios solares.”

## 2.5 Efeito fotovoltaico

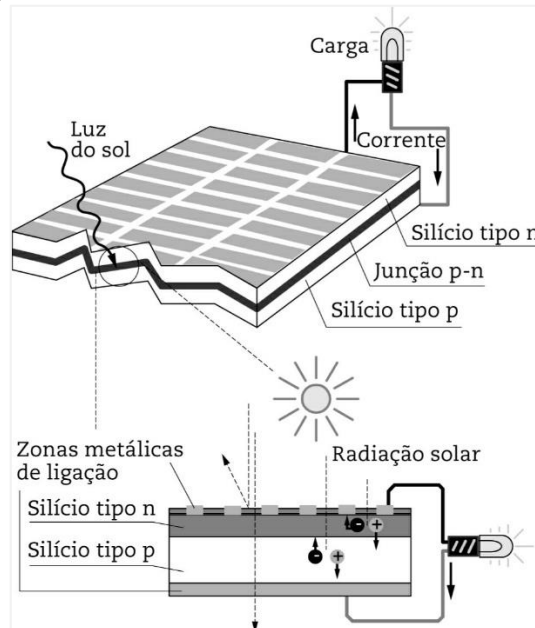
O efeito fotovoltaico foi observado em 1839 por Edmond Becquerel, ele constatou o surgimento de uma diferença de potencial ou tensão nas extremidades de uma junção semicondutora quando exposto à luz, sendo a célula fotovoltaica o dispositivo primário de conversão da energia solar em energia elétrica. (CRESESB, 2008)

Os semicondutores mais utilizados estão presentes nos elementos do grupo IV da tabela periódica, sendo os mais comuns o silício (Si) e o germânio (Ge), submetidos a dopagem. O processo de dopagem consiste em fazer a troca de alguns átomos da estrutura cristalina por átomos pentavalentes ou trivalentes. Caso a dopagem seja feita com átomos pentavalentes como fósforo, o cristal resultante é do tipo N. Se feita com átomos trivalentes, o cristal é do tipo P. (MORI; SANTOS; SOBRAL, 2007).

## 2.6 Célula e módulo fotovoltaicos

A célula fotovoltaica é um dispositivo capaz de transformar energia luminosa em elétrica. Tudo acontece na camada de junção pn onde o sistema está em equilíbrio na ausência da luz, ou seja, os elétrons livres estão ligados as lacunas ou buracos, mas ao ser exposto à luz o sistema entra em desequilíbrio, de tal modo que haverá uma energia suficiente para romper as ligações na junção, impondo uma circulação de elétrons da célula para a carga, ou seja, surgimento da corrente elétrica. Na Figura (2) é mostrado o processo de conversão da célula fotovoltaica.

**Figura 2 - Processo de conversão da célula fotovoltaica.**



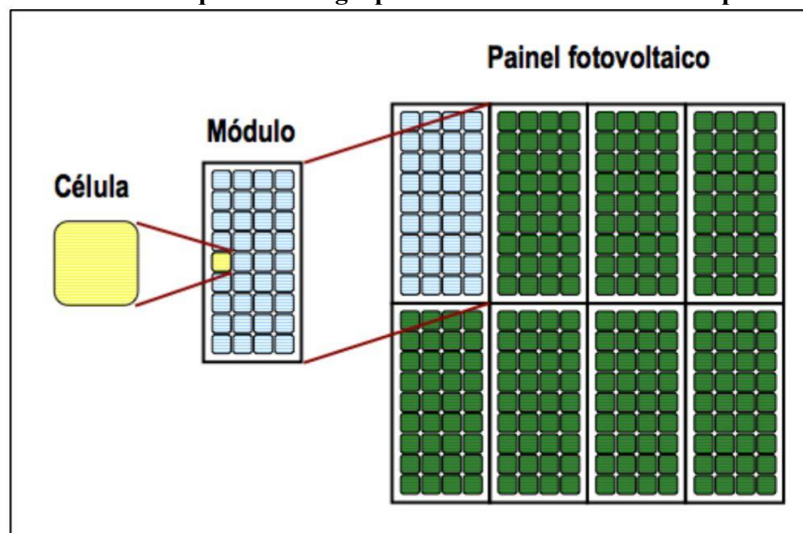
Fonte: ZILLES *et al.*, (2012)

Para captar a energia elétrica das células são impressas várias trilhas secundárias e principais para que os elétrons fluam para a carga.

Na fabricação deste dispositivo há diferentes semicondutores utilizados, tais como: o silício cristalino (c-Si); o silício amorfo hidrogenado (a-SiH ou simplesmente a-Si); o telúrio de cádmio (CdTe) e compostos relacionados ao disseleneto de cobre e índio (CuInSe<sub>2</sub> ou CIS). (MORI; SANTOS; SOBRAL, 2007).

O módulo fotovoltaico se caracteriza por um conjunto de células ligadas eletricamente entre si, normalmente (ligadas em série), possibilitando uma gama maior de aplicações. Já um conjunto de módulos é denominado por painel fotovoltaico (do Inglês, *array*). Por sua vez podendo ser associados em série, paralelo ou misto, a fim de obter valores de tensão ou corrente desejada. (CARNEIRO, 2010). Na Figura (3) é possível ver a hierarquia de tais associações.

**Figura 3 - Processo hierarquizado de agrupamento: célula → módulo → painel fotovoltaico**

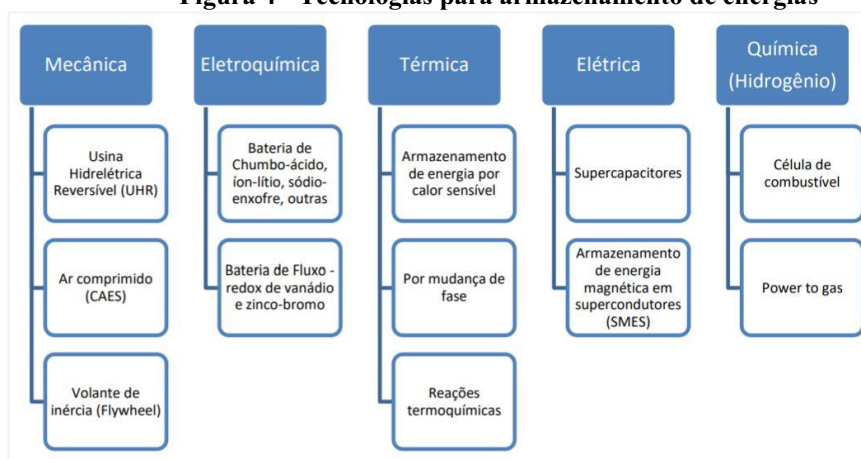


Fonte: Carneiro (2010)

## 2.7 Sistemas de armazenamento de energia.

O sistema de armazenamento de energia é constituído por reservatórios com capacidade de fornecer energia útil para uma unidade geradora ou conversora de energia.

Com o sistema de armazenamento de energia temos a capacidade de converter, armazenar e converter a energia de modo controlado. Permitindo assim postergar investimentos em transmissão e distribuição; mitigação de riscos de corte de carga e de geração. (CORREIA, 2021). A Figura (4) apresenta as principais tecnologias para armazenamento de energia.

**Figura 4 - Tecnologias para armazenamento de energias**

**Fonte: EPE (2019)**

Dentre os diversos meios de armazenamento, o armazenamento por meio de baterias vem se destacando por apresentar alta densidade de energia, alta eficiência, baixíssimo tempo de resposta em operação e flexibilidade na instalação. (EPE, 2019)

### 2.7.1 Baterias eletroquímicas

Existem várias tecnologias de armazenamento de energia, entretanto a mais difundida nos sistemas solares são as baterias eletroquímicas, sendo esta capaz de converter a energia elétrica em energia potencial química, por outro lado o processo inverso também é válido. (FREITAS, 2017).

As pilhas ou baterias recarregáveis denominadas de secundárias são compostas por dois eletrodos (um de menor potencial “ânodo” polo negativo e outro de potencial mais elevado “cátodo” polo positivo) e substância eletrolítica também conhecida por eletrólito, sendo este último um condutor iônico que pode ser líquido, sólido ou pastoso. (Melo; Gandara; Nunes, 2012)

De acordo com Melo (2021), o eletrodo de menor potencial é uma fonte de elétrons para o sistema, em contrapartida o eletrodo de maior potencial é um sorvedouro de elétrons.

Alguns critérios do desempenho das baterias podem ser analisados conhecendo a energia específica (Wh/kg), a densidade de energia (Wh/L), a capacidade de carga (Ah) e a taxa C-rate conhecida por taxa C, que determina a rapidez com que as baterias podem ser carregadas ou descarregadas em um sistema de armazenamento. (VILLALVA, 2021)

A carga rápida é indispensável para sistemas com baterias. Considerando duas baterias com correntes nominais iguais e uma taxa C distintas, o sistema com maior C-Rate, é capaz de fornecer uma quantidade de energia superior para o sistema no mesmo intervalo de tempo.



Segundo Pinho e Galdino (2014, p. 168) a densidade de energia é a “capacidade de energia nominal normalizada pelo volume (Wh/L) ou pela massa (Wh/kg) da célula ou bateria”.

É possível mensurar a vida útil da bateria analisando o número de ciclos, profundidade de descarga e temperatura. O primeiro corresponde a quantidade de descargas feitas, já o segundo implica o percentual da descarga. Entretanto o número de ciclos de uma bateria é inversamente proporcional à profundidade de descarga e a temperatura, com isso uma bateria pode apresentar falhas antecipadas quando a temperatura de operação e a profundidade de descarga aumentam. (Pinho e Galdino, 2014).

As baterias de lítio são consideradas baterias com tecnologia de armazenamento promissora, pois apresentam altas densidades energéticas, entre 80-150 Wh/kg, ausência do efeito memória, altas taxas de carga e descarga, o baixo tempo de carga e uma baixa taxa de autodescarga. A célula apresenta tensão nominal de 3,5V, que pode ser agrupada em série em um bloco de 4 células (12V) ou 8 células (24V). Entretanto, esse agrupamento em blocos exige um sistema de controle e segurança incluindo proteção contra sobrecarga, descarga excessiva, sobrecorrente, curto-circuito, altas temperaturas e tensões elevadas. (Pinho e Galdino, 2014).

## 2.7.2 Comparação de baterias de chumbo-ácido e Lítion-ion para armazenamento estacionário em sistemas de energia fora da rede

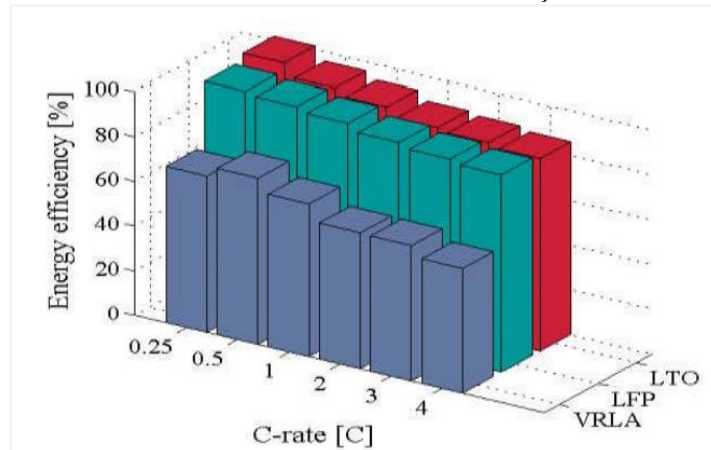
As baterias são um componente amplamente utilizado e cada vez mais em sistemas estacionários de energia. Muitos fatores diferentes mostram as vantagens das baterias de íon-lítio sobre as baterias de chumbo-ácido. Em um estudo comparativo Keshan, Jesse e Ustun (2016) analisou os principais fatores que diferenciam os dois tipos de baterias no planejamento de instalação de armazenamento de energia.

### 2.7.2.1 Eficiência

Uma bateria é energeticamente eficiente é definida como "a razão entre a energia de descarga e a energia de carga" (STAN, 2014).

Conforme Gráfico (2) as medições de capacidade das baterias Li-íon são quase 100% eficientes em baixas taxas de C (taxa C determina a velocidade com que os sistemas de armazenamento podem ser carregados e descarregados), conforme mostrado para o tipo Fosfato de ferro-lítio (LFT), Óxido de titanato de lítio (LTO).

**Gráfico 2 - Eficiência de diferentes baterias em função taxa C em 25° C**



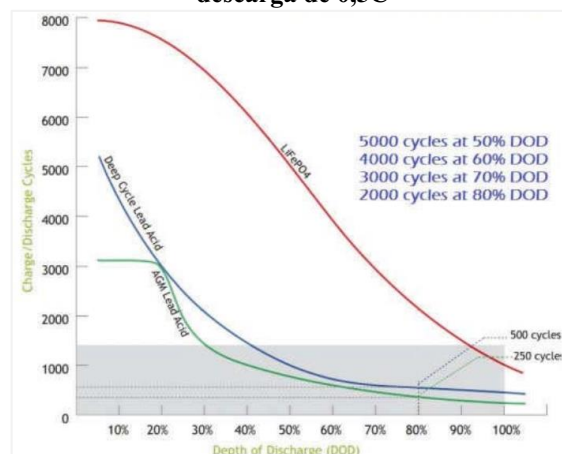
Fonte: Keshan, Jesse e Ustun (2016)

Por outro lado, a eficiência da bateria Chumbo-ácido (VRLA) atinge um pico de 75% e cai para 55% na taxa C de 4. Baterias de íon de lítio apresentam variações muito pequenas em sua eficiência, enquanto as de chumbo-ácido são menos eficientes. (STAN et al., 2014)

### 2.7.2.2 Ciclo de vida

Quando o ciclo de vida (número de ciclos de carga/descarga) é considerado, as baterias de íons de lítio superam a baterias de chumbo-ácido por um fator maior que 2 para todas as profundidades de descarga (DOD) as baterias de chumbo-ácido (VRLA) normalmente operam por 2 a 5 anos, conforme o Gráfico (3). A vida útil varia significativamente com o estado de carga da bateria, a 50% do estado de carga e 25°C li-íon pode operar de 20 a 25 anos, enquanto 100% do estado de carga cai para 12 a 16 anos. (CLEAN TECHNICA, 2016)

**Gráfico 3 - Ciclo de vida da bateria baseado na profundidade de descarga, com corrente de descarga de 0,5C**



Fonte: Keshan, Jesse e Ustun (2016)

Os resultados do estudo Keshan, Jesse e Ustun (2016). Mostraram que: a bateria de lítio-íon tem eficiência 5-10 vezes maior, e essa eficiência é altamente afetada quando a taxa de carga e descarada bateria é maior; A vida útil da bateria de lítio tem maior eficiência quanto ao ciclo de vida das baterias de chumbo-ácido, porém quanto maior é a profundidade de descarga dos dois tipos, menor será sua vida útil; Em relação aos custos, a bateria de chumbo-ácido tem um custo inicial drasticamente menor, no entanto as baterias de lítio podem até ser preferíveis em termos de preço quando o custo inicial é dividido por toda a vida útil operacional

### 2.7.3 Estudo comparativo dos tipos de baterias de lítio

Existem vários tipos de tecnologias de baterias, mas as mais utilizadas são as baterias de íons de lítio. Eles se destacam em termos de eficiência energética, vida útil e densidade de energia e potência, mas são caros e têm um ciclo de vida limitado. (VELLA, 2018). As baterias de íon de lítio são fabricadas em diversos tipos de tecnologias e nomeadas de acordo com os materiais utilizados em seus eletrodos: (LINDEN; REDDY, 2010)

- Óxido de lítio-cobalto (LCO);
- Óxido de Lítio-Manganês (LMO);
- Níquel-Cobalto-Alumínio (NCA);
- Níquel-Manganês-Cobalto (NMC);
- Lítio-Ferro-Fosfato (LFP);
- Lítio-Titanato-Óxido (LTO).

Valle (2018), fez um estudo comparativo para determinar qual a tecnologia de bateria é mais adequada para aplicações de armazenamento de energia, avaliando o desempenho e vida útil sob este tipo de operação.

Quatro tipos diferentes de baterias de lítio foram testados sob vários protocolos de teste para avaliar sua aplicabilidade em aplicações de armazenamento de energia. Primeiramente, foram realizados testes de condicionamento para avaliar o comportamento cinético e termodinâmico das baterias de íon lítio, juntamente com as variações célula a célula.

Os resultados mostraram que o LTO apresenta a maior dispersão nas capacidades entre os modelos de baterias idênticos, embora tenham apresentado o melhor comportamento termodinâmico. Os testes de medição de resistência interna permitiram a identificação dos

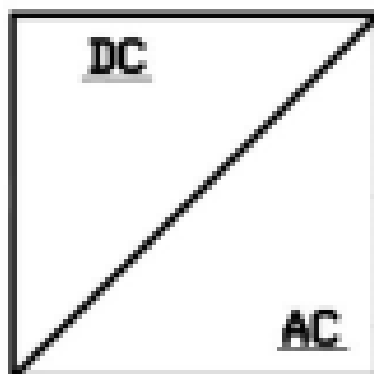
diferentes componentes da resistência interna. Os testes focaram na medição da resistência ôhmica, que é de grande importância nos sistemas de armazenamento de energia.

Os resultados mostraram que as baterias LFP tiveram uma resistência ôhmica quase constante entre todos os seus estados de carga. Os testes de corrente constante e os testes de potência constante evidenciaram que as baterias LTO apresentaram as menores eficiências entre os modelos estudados, tanto em termos de energia quanto de carga. As baterias NMC e LFP apresentaram bons resultados em termos de eficiência. Por fim, os testes de carga rápida mostraram resultados semelhantes aos testes de descarga de alta corrente, em termos de eficiência energética, confirmando que as células LTO apresentam uma eficiência inferior às células LFP e NMC.

## 2.8 Conversores CC/CA

O conversor CC/CA conhecido popularmente como inversor é um dispositivo eletrônico que converte a corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), seu uso é necessário para fazer o sincronismo e conexão da usina fotovoltaica na rede elétrica, pois os módulos e baterias trabalham em (CC) e a rede da concessionária em (CA). (Matias, 2018)

Figura 5 - Representação do inversor

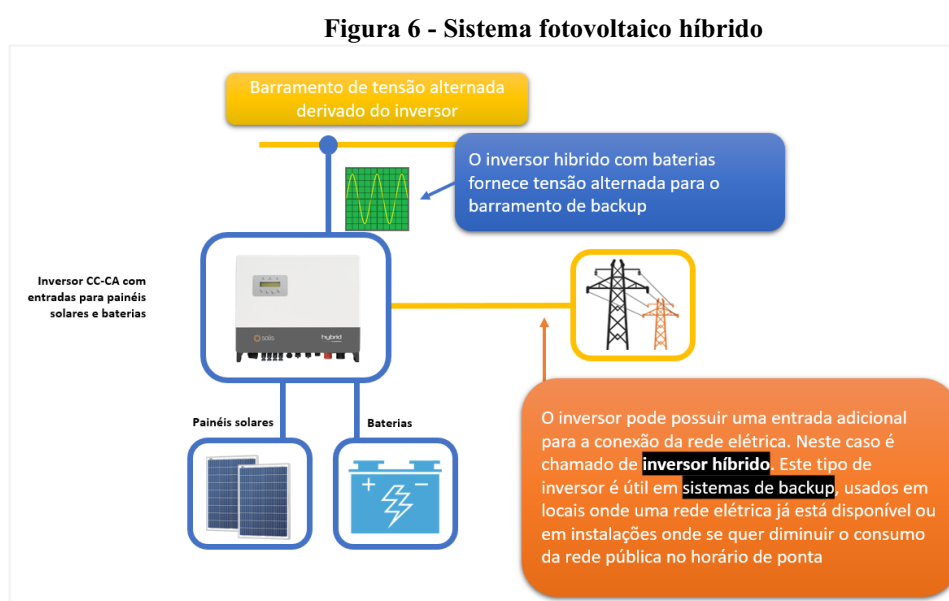


Fonte: NBR 10899 (2013)

Segundo Pinho e Galdino (2014) as fontes de energia elétrica em corrente contínua (CC) pode ser proveniente, por exemplo, de baterias e módulos fotovoltaicos. Na parte de corrente alternada (CA) a saída do inversor deve-se ter tensão e frequência sincronizada com a tensão da rede. A Figura (5) mostra a representação gráfica do inversor.

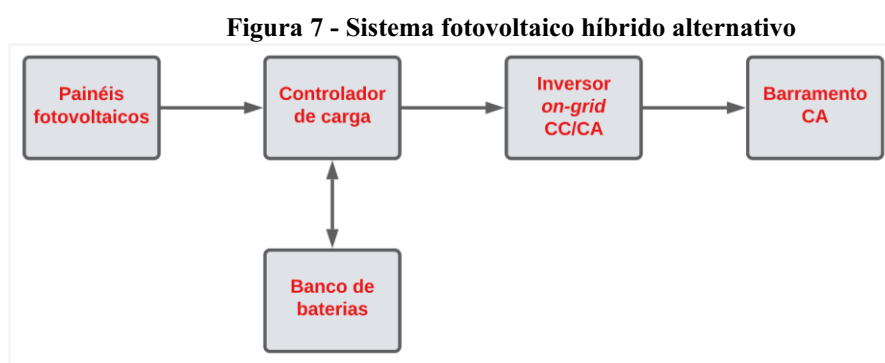
## 2.9 Sistemas fotovoltaicos híbridos conectados à rede

O sistema híbrido é caracterizado pela geração de energia elétrica por meio de diferentes fontes renováveis associadas eletricamente entre si, sendo está localizada em uma mesma unidade consumidora, podendo ser conectado à rede (on-grid) ou em conexão com a rede (off-grid). Já os sistemas fotovoltaicos híbridos segundo Sterzelecki (2018, p.71) “são compostos pelo arranjo fotovoltaico, pelo banco de baterias e pelo inversor bidirecional/ híbrido e suas conexões com a rede pública, cargas não-críticas e cargas críticas”. A Figura (6) mostra a representação esquemática do sistema híbrido.



Fonte: Vinturini (2021)

Na ausência de um inversor híbrido on-grid certificado pelo INMETRO, pode-se montar um gerador fotovoltaico com um *layout* diferente como apresentado na Figura (7).



Fonte: Do autor

## 2.10 Controlador de carga

O controlador de carga caracteriza-se como um gerenciador de energia, que tem como objetivo fazer a carregamento e descarregamento dos bancos de baterias de modo a garantir segurança e aumentar a vida útil do sistema. O controlador além de carregar os bancos de bateria tem por finalidade evitar a corrente reversa da bateria para o painel solar durante a noite e sobrecarga da bateria. (Pinho e Galdino, 2014)

Na especificação de um controlador de carga o projetista deve garantir que a corrente máxima do controlador seja maior que a corrente de curto circuito dos módulos multiplicado por um fator de 1,25. Além disso, outras características relevantes são: desvio da energia do gerador fotovoltaico quando a bateria estiver completamente carregada e a compensação térmica baseada num sensor de temperatura externo a ser fixado na carcaça da bateria (Pinho e Galdino, 2014).

## 2.11 Metodologia para projetar um gerador fotovoltaico com armazenamento em baterias.

O projeto de um sistema fotovoltaico requer o conhecimento dos dados medidos de irradiação próxima da unidade consumidora, características de conversão dos dispositivos fotovoltaicos que determinam a quantidade da energia disponível para atendimento da carga. (Pinho, 2008)

De acordo com Meira (2021), existem dois fatores limitantes para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos: a área disponível para fixar os módulos fotovoltaicos e a demanda contratada, ou seja, a potência de geração fotovoltaica deve ser igual ou inferior à demanda contratada junto à concessionária de energia elétrica. O procedimento para o dimensionamento do sistema de geração pode ser resumido da seguinte forma:

- Levantar os dados de irradiação solar do local de instalação da usina solar;
- Realizar o levantamento de consumo e demanda da unidade consumidora;
- Escolher o modelo do módulo fotovoltaico;
- Escolher o modelo controlador;
- Escolher o modelo da bateria;
- Escolher o modelo de inversor solar;
- Dimensionar cada *string* e suas devidas proteções;

- Dimensionar proteções para o lado de corrente alternada;

## **2.12 Dados da Irradiação Solar**

Os índices de irradiação solar ( $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ ) são usados no dimensionamento da usina solar, que é a energia fornecida pelo sol em um intervalo de tempo, podendo este ser em dia, mês e ano. Os dados solarimétricos podem ser encontrados na forma de irradiância e horas de sol pleno (HSP). O primeiro consiste na potência por unidade de área ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ ). Já a segunda é definida como o número de horas diárias que deve ser obtida da razão entre  $1000\text{Wh}/\text{m}^2$  pela irradiação total incidente no dia. (Pinho e Galdino, 2014)

Os dados da irradiação do local podem ser consultados no banco de dados Sundata do CRESESB, informando as coordenadas geográficas da unidade consumidora.

## **2.13 Dados do consumo e demanda**

O levantamento do consumo e demanda da unidade consumidora vai ser obtido na própria fatura de energia antes da pandemia do coronavírus (COVID-19), onde está presente histórico de consumo, demanda e pagamentos do período de doze meses.

## **2.14 Escolha do módulo fotovoltaico, controlador, bateria e inversor**

A escolha do módulo está diretamente ligada ao seu custo, eficiência, potência e dimensões. Vale ressaltar que o painel deve ser do mesmo fabricante, pois no manual há especificações de corrente, tensão máxima do sistema entre outros, que caso não seja levado em consideração venha a comprometer os painéis fotovoltaicos.

Na ausência de controlador de carga para aplicações de grande porte onde o mesmo consiga gerenciar elevadas potências, faz-se necessária a utilização de vários controladores em paralelo.

Na seleção da bateria, deve-se ter informações do número de ciclos, capacidade (Ah e Wh), limite de expansão em (kWh), quantidade de baterias que podem ser ligadas em série e paralelo, limites de corrente e tensão tanto de carga quanto de descarga. Estas informações devem ser averiguadas entre as opções disponíveis de fabricantes adequando o projeto em relação ao custo, confiabilidade e durabilidade desejadas. (Pinho e Galdino, 2014)

## 2.15 Dimensionamento da Usina Solar

O cálculo do consumo de energia ativa diária ( $L_i$ ) considera o consumo das cargas em corrente contínua e alternada, e a eficiência dos equipamentos que fazem parte do processo de armazenamento e condicionamento de potência. (Pinho e Galdino, 2014)

$$L_i = \left( \frac{L_{CCi}}{n_{bat}} \right) + \left( \frac{L_{CAi}}{n_{bat} * n_{inv}} \right) \quad (1)$$

Sendo:

$L_i$  (Wh/dia) - Energia consumida diariamente no mês  $i$ ;

$L_{CCi}$  (Wh/dia) - Energia consumida diariamente em corrente contínua em determinado mês  $i$ ;

$L_{CAi}$  (Wh/dia) - Energia consumida diariamente em corrente alternada em determinado mês  $i$ ;

$n_{bat}$  (%) - Eficiência da bateria;  $n_{inv}$  (%) - Eficiência do inversor.

Com o consumo corrigido obtido na Equação (1), calcula-se a potência do painel fotovoltaico ( $W_p$ ) para todos os meses do ano conforme a Equação (2). (Pinho e Galdino, 2014)

$$P_m = \max_{i=1}^{12} \left( \frac{L_i}{HSP_i * Red_1 * Red_2} \right) \quad (2)$$

Sendo:

$P_m$  (Wp) - Potência do painel fotovoltaico;

$L_i$  (Wh/dia) - Energia consumida diariamente no mês  $i$ ;

$HSP_i$  (h/dia) - Horas de sol pleno no mês  $i$ ;

$Red_1$  (%) - Fator de redução (derating) da potência dos módulos fotovoltaicos;

$Red_2$  (%) - Fator de redução da potência devido a perdas no sistema.

Seleciona-se o mês com maior  $W_p$  (watt-pico), que é definido como a unidade potência de saída do gerador fotovoltaico, considerando as condições padrão de teste. (Pinho e Galdino, 2014)



Com os dados de operação do controlador e módulos, consegue-se determinar o número de módulos em série usando a expressão (3). (Pinho e Galdino, 2014)

$$\frac{V_{SPPMmin}}{V_{mpTmax}} < N^{\circ} \text{ módulos série} < \frac{V_{SPPMmax}}{V_{mpTmin}} \quad (3)$$

Sendo:

$V_{SPPMmax}$  - Máxima tensão de operação;

$V_{SPPMmin}$  - Mínima tensão de operação;

$V_{mpTmax}$  - Tensões de máxima potência do módulo fotovoltaico nas suas máximas temperaturas de operação;

$V_{mpTmin}$  - Tensões de mínima potência do módulo fotovoltaico nas suas máximas temperaturas de operação.

Para o cálculo do número de módulos em paralelo, divide-se a potência total do gerador ( $P_m$ ) pelo número de módulos em série vezes a potência de cada módulo ( $P_{mod}$ ), usando a Equação (4). (Pinho e Galdino, 2014)

$$N^{\circ} \text{ módulos\_paralelo} = \frac{P_m}{N^{\circ} \text{ módulos série} * P_{mod}} \quad (4)$$

Sendo:

$P_m$  (Wp) - Potência do painel fotovoltaico;

$P_{mod}$  (Wp) - Potência nominal do módulo adotado.

Calcula-se a corrente do painel ( $I_m$ ) usando a equação (5), com isso pode-se verificar se a corrente do painel é adequada com as especificações do fabricante do controlador. (PINHO; GALDINO, 2014)

$$I_m = N^{\circ} \text{ módulos\_paralelo} * I_{mp} \quad (5)$$

Sendo:

$I_m$  (A) - Corrente do painel;

$I_{mp}$  (A) - Corrente do módulo no ponto de máxima potência, nas condições padrão de ensaio

Com o maior valor do consumo de energia corrigida obtida com equação (1), é possível calcular a capacidade do sistema de armazenamento usando a Equação (6) e (7). (PINHO; GALDINO, 2014)

$$CB \text{ (Wh)} = \frac{L_m * N_{\text{dias}}}{P_d} \quad (6)$$

Sendo:

$L_m$  (Wh) - Consumo máximo no mês  $L_i$ ;

CB (Wh) - Capacidade do banco de baterias;

$N_{\text{dias}}$  - O número de dias de autonomia;

$P_d$  - Profundidade de descarga;

$$CBI \text{ (Ah)} = \frac{CB}{V_{\text{sist}}} \quad (7)$$

Sendo:

CBI (Ah) - Capacidade do banco de baterias;

$V_{\text{sist}}$  - Tensão nominal do sistema;

$P_d$  - Profundidade de descarga.

Após o cálculo da capacidade do sistema de armazenamento, deve-se calcular o número de baterias em paralelo e série com as Equações (8) e (9). (PINHO; GALDINO, 2014)

$$N^\circ \text{ baterias paralelo} = \frac{CBI}{CBI_{\text{bat}}} \quad (8)$$

$$N^\circ \text{ baterias série} = \frac{V_{\text{sist}}}{V_{\text{bat}}} \quad (9)$$

Sendo:

$CBI_{\text{bat}}$  (Ah) - Capacidade da bateria selecionada;

$V_{\text{bat}}$  - Tensão nominal da bateria selecionada.

Quando se faz o dimensionamento do controlador de carga é necessário saber os limites mínimo e máximo de operação, tanto de tensão quanto de corrente (CC). A corrente máxima do controlador é dada pela Equação (10): (PINHO; GALDINO, 2014)

$$I_c = 1,25 * N^\circ \text{módulos\_paralelo} * I_{sc} \quad (10)$$

Sendo:

$I_c$  (A) - Corrente máxima do controlador;

$I_{sc}$  (A) - Corrente de curto circuito do módulo.

Caso o valor de  $I_c$  exceda a corrente do controlador em análise, faz-se necessário calcular o número de controladores em paralelo de acordo com a Equação (11). Vale ressaltar que se deve verificar no manual o número máximo de controladores que podem ser ligados em paralelo. (PINHO; GALDINO, 2014)

$$N^\circ \text{controladores\_paralelo} = \frac{I_c}{I_{ctl}} \quad (11)$$

Sendo:

$I_c$  (A) - Corrente máxima do controlador;

$I_{ctl}$  (A) - Corrente máxima do controlador.

A tensão de operação máxima do controlador de carga ( $V_{Cmax}$ ) pode ser consultada no manual do fabricante. Devendo esta ser maior que o número de módulos em série multiplicado pela tensão de circuito aberto na condição de menor temperatura ( $V_{ocTmin}$ ) prevista na operação do módulo. (PINHO; GALDINO, 2014)

$$V_{Cmax} > N^\circ \text{módulos série} * V_{ocTmin} \quad (12)$$

Sendo:

$V_{Cmax}$  (V) - Máxima tensão de operação do controlador de carga;

$V_{ocTmin}$  (V) - Tensão de circuito aberto do módulo.

No caso de um sistema off-grid a potência do inversor deve ser igual ou superior à maior potência da curva de carga. Já um sistema híbrido conectado à rede deve ser igual ou superior à potência do controlador de carga. Outro fator importante a ser analisado é a compatibilidade entre o inversor e o controlador de carga. (PINHO; GALDINO, 2014)

## **2.16 Dimensionamento do Sistema de Proteção**

Segundo Pinho e Galdino (2014) os componentes mínimos de um sistema de proteção são: dispositivos de proteção contra surtos (DPS), chaves seccionadoras, disjuntores, sistemas de aterramento e sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA). Em caso onde a potência da usina seja elevada faz-se necessário consultar o módulo 3 do Procedimentos de Distribuição (PRODIST) e se adequar as proteções preconizadas pela a norma.

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 Classificação da pesquisa**

Segundo Nascimento (2016), a pesquisa pode ser classificada quanto a natureza, aos métodos, quanto aos objetivos e quanto aos procedimentos.

##### **3.1.1 Quanto a natureza**

Este trabalho tem a natureza de ser uma pesquisa aplicada à geração de conhecimento para uma situação particular, nessa situação busca-se a solução de um problema específico, que é minimizar os custos energéticos de uma unidade consumidora. Aplica-se procedimentos orientados e dirigidos à busca da verdade por meio da aplicação de uma conjuntura de procedimentos matemáticos analíticos.

##### **3.1.2 Quanto métodos ou abordagem**

Este trabalho tem como objetivo o dimensionamento dos materiais necessários para a instalação e execução de um projeto que visa a instalação de um sistema de geração e armazenamento de energia. Portanto este trabalho é classificado como uma pesquisa quantitativa e nos resultados não existe o juízo de valor relacionado ao custo da implementação deste projeto, no entanto, adicionalmente foi feito o levantamento dos valores dos equipamentos dimensionados.

##### **3.1.3 Quanto aos objetivos**

Este trabalho pode ser classificado como uma pesquisa exploratória e descritiva. No que tange a pesquisa ser de cunho exploratória está relacionado ao fato de inicialmente no referencial teórico busca-se a familiarização com o problema objeto de estudo deste trabalho, para assim permitir a construção do conhecimento. Este levantamento bibliográfico serve como uma base que solidifica as ações que precedem as decisões quanto ao dimensionamento de equipamentos com alto valor agregado. E essa pesquisa tem cunho descritivo, pois na segunda parte do referencial teórico é feita uma descrição detalhada dos procedimentos matemáticos

necessários para dimensionar os elementos que compõem um sistema de geração e armazenamento de energia fotovoltaica.

#### 3.1.4 Quantos aos procedimentos

Os procedimentos adaptados para obter os resultados desta pesquisa foram: estudo de caso, pesquisa bibliográfica, levantamento.

O estudo de caso deste trabalho é composto por três fases: pesquisa exploratória; coleta e delimitação do estudo; análise e interpretação das descobertas. Trata-se do estudo singular visando o dimensionamento dos sistemas de geração e armazenamento de energia para mitigar o consumo de energia no horário de ponta. A coleta de dados foi realizada por meio da conta de energia elétrica emitida pela COPEL. A delimitação e necessidade deste estudo vem do resultado da análise desta conta, que mostra que o valor do consumo de energia durante o período de ponta é três vezes maior do que o valor da energia consumida fora e ponta. Este estudo mostra que aproximadamente um terço do faturamento de energia é correspondente ao consumo de ponta.

Como este trabalho é um estudo de caso, o resultado obtido nesta pesquisa não se aplica a outras unidades consumidoras, pois cada local tem o seu perfil de consumo e demanda. Portanto este estudo tem suas próprias particularidades ou peculiaridades que o diferencia de outros casos.

A pesquisa bibliográfica deste trabalho consistiu na leitura seletiva, analítica e interpretativa de livros, artigos, reportagens, textos da internet e imagens. Todas estas bibliografias se encontram na seção de referências bibliográficas.

## 4 RESULTADOS

O trabalho tem como objetivo reduzir o consumo de energia elétrica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Medianeira no horário de ponta, com isso faz-se necessário um estudo da geração fotovoltaica com armazenamento em baterias através da metodologia do Mês Crítico, que consiste no período onde teve o valor mínimo diário anual de irradiação solar média do ano.

Espera-se minimizar os gastos com consumo de energia na hora de ponta totalmente ou parcialmente, a fim de buscar alternativas que tornem o campus sustentável no que tange a eficiência energética. O Quadro (2) mostra as informações relativas à unidade consumidora usando para o estudo de caso deste trabalho.

**Quadro 2 – informações relativas à unidade consumidora**

Cliente:	Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR				
Cidade:	Medianeira	CEP:	85884-000	UF:	PR
Potência total de transformação:	800kVA				
Demanda contratada:	450kW				
Tensão contratada na média tensão MT:	13800V				
Baixa tensão BT:	120/220V				
Corrente na média tensão (MT):	33,47A				
Corrente de Curto Circuito na MT:	600A				
Enquadramento tarifário escolhido:	Tarifa horária verde				

Fonte: Do Autor

### 4.1 Perfil de consumo de energia do campus medianeira da UTFPR

O campus Medianeira da UTFPR possui contrato tarifário na modalidade horosazonal verde, está classificada como grupo A e contida no subgrupo A4. Essa modalidade tarifária considera para o faturamento as seguintes grandezas: consumo de energia na ponta; consumo fora de ponta; maior demanda registrada durante o mês. Se a maior demanda registrada for menor que a demanda contratada, então o valor da tarifa passa a ser isenta de ICMS. A Tabela (3), apresenta os valores praticados pela concessionária COPEL no mês de junho de 2022, estes valores foram usados para obter os resultados do Gráfico (6):

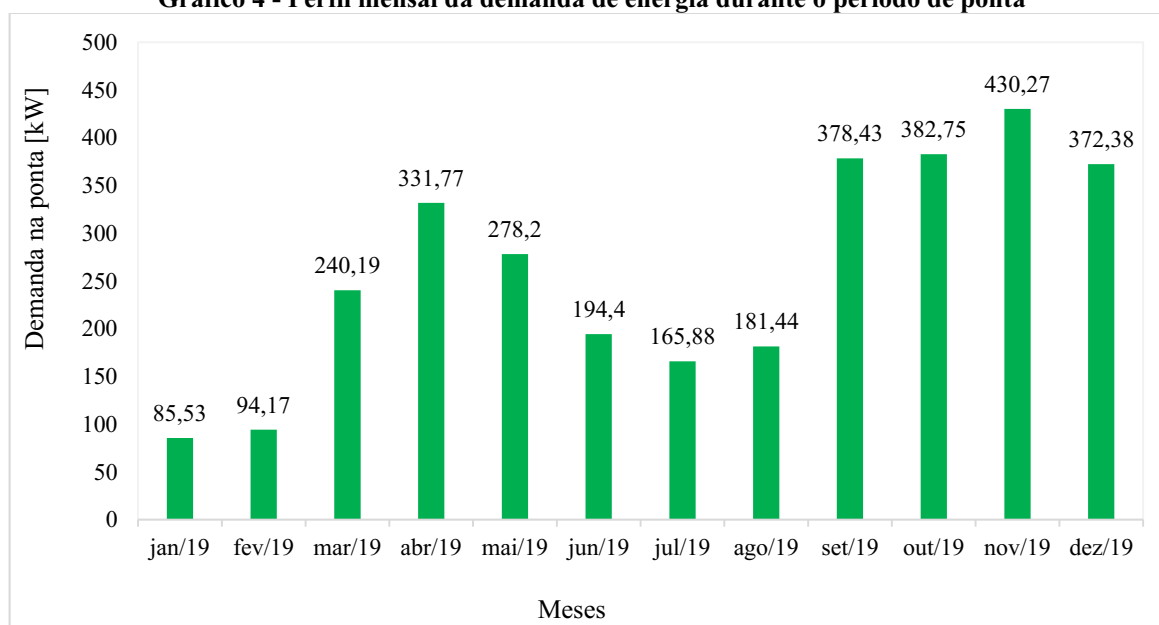
Tabela 3 – Tarifa COPEL atualizada (02/06/2022)

Grandeza	Tarifas	
Consumo fora de ponta [kWh]	R\$	0,532680
Consumo de ponta [kWh]	R\$	2,079000
Demanda [kW]	R\$	25,400000
Demanda isenta de ICMS [kW]	R\$	17,07
Ultrapassagem de demanda [kW]	R\$	50,80

Fonte: Fatura de energia da UTFPR (2019)

Como pode ser visto, o valor faturado para o consumo de ponta é 3,81 vezes maior do que o valor do consumo de ponta. O intuito deste trabalho é mitigar os impactos desta grandeza na fatura de energia. Para avaliar o perfil do comportamento anual, o Gráfico (4), mostra o perfil de demanda mensal de energia elétrica na ponta, neste é possível observar que o mês onde houve a maior demanda registrada em novembro.

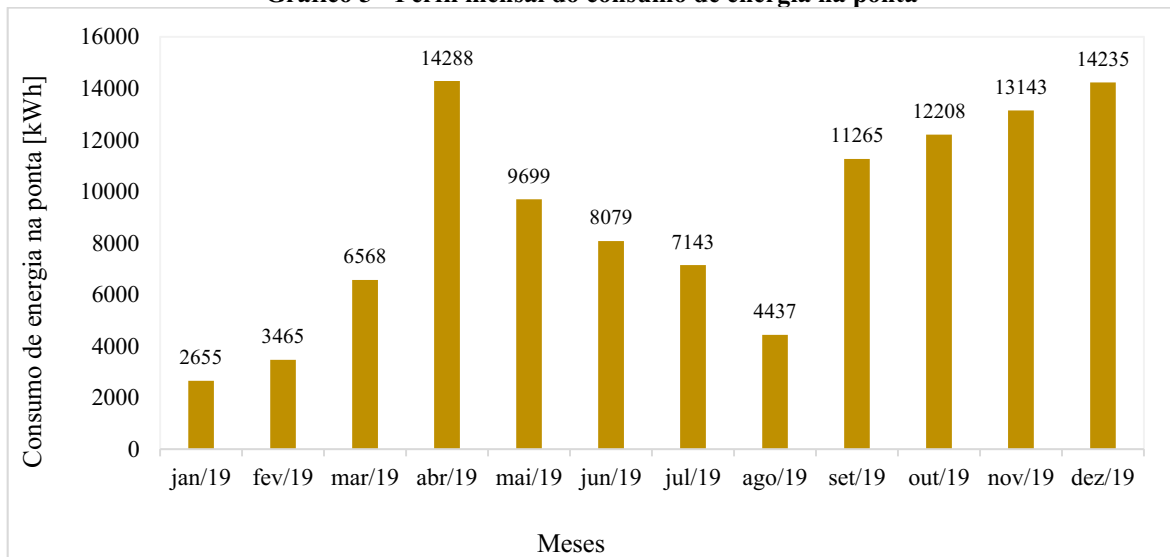
Gráfico 4 - Perfil mensal da demanda de energia durante o período de ponta



Fonte: Adaptado de COPEL (2019)

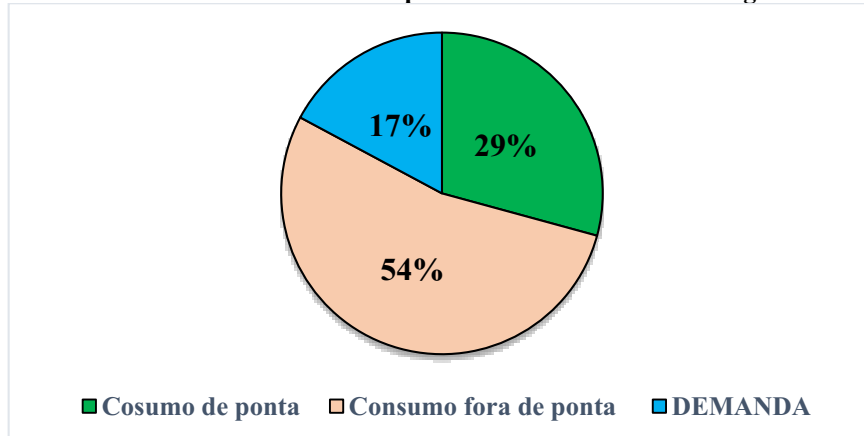
Todavia, o maior consumo de energia, foi no mês de abril, essa informação do ser vista no Gráfico (5):



**Gráfico 5 - Perfil mensal do consumo de energia na ponta**

Fonte: Adaptado Copel (2019)

O consumo de energia durante o período de ponta tem um grande peso no valor final da fatura de energia de da UTFPR. Durante o período considerado, o valor pago pelo consumo na ponta foi de R\$ 210826,57. Sendo que o custo total do consumo de energia durante o ano foi de R\$ 502619,27. Em outras palavras, o consumo de ponta compõe 29% dos custos com energia elétrica do campus. O Gráfico (6) resume as informações supracitadas.

**Gráfico 6 - Influência do consumo de ponta no faturamento de energia da UTFPR**

Fonte: Do autor

Portando o objetivo deste trabalho se propõem a eliminar o consumo fora de ponta e assim obter economia de 31% na fatura de energia do campus. Para isso, será usado um banco de baterias para alimentar o campus durante o período de ponta. E o banco de baterias será carregado por meio de um sistema de geração fotovoltaica.

#### 4.2 Dimensionamento do sistema *Off-Grid*

Para dimensionar o sistema *Off-Grid* este trabalho utiliza o seguinte passo a passo: levantamento de demanda de energia elétrica (carga); dimensionamento do banco de baterias; dimensionamento do arranjo fotovoltaico (painéis solares); dimensionamento dos dispositivos de controle (Controlador e inversor); cabeamento e proteção.

#### 4.2.1 Levantamento de demanda de energia elétrica (carga)

A demanda de energia elétrica que o banco de baterias deve suprir será o maior consumo registrado no histórico de faturamento de energia da COPEL. Denomina-se este método de mês crítico, com isto pode-se garantir que o sistema suprirá o consumo no pior cenário possível.

O maior valor mensal de consumo no horário de ponta ( $L_i$ ) registrado pela concessionária de energia foi de 14288kWh no mês de abril. Salienta-se que esse valor deve ser corrigido devido ao rendimento dos aparelhos utilizados nos sistemas como um todo. Essa correção é feita de acordo com a Equação (1), essa equação leva em consideração a eficiência da bateria que será usada no projeto  $\eta_{bat}$  e a eficiência do inversor  $\eta_{inv}$ . Estes dois fatores foram obtidos na escolha prévia dos equipamentos que serão usados no projeto, respectivamente. Portanto o valor máximo de energia consumida diariamente durante o horário de ponta obtida como resultado foi de 512kWh.

#### 4.2.2 Dimensionamento do arranjo fotovoltaico (painéis solares)

Inicialmente, para dimensionar o arranjo fotovoltaico foi usada a Equação (3) para calcular o número de módulos que devem ficar em série. Essa equação nos dá o intervalo do número máximo e mínimos de módulos a serem usados em série no arranjo.

Para calcular o número máximo de módulos usa-se a tensão máxima de operação ( $V_{SPPMax}$ ), que é dada pelo datasheet do módulo escolhido, esse valor deve ser dividido pela tensão de máxima potência na temperatura mínima de operação do módulo ( $V_{pmTmim}$ ). A temperatura mínima usada para realizar este cálculo foi de 10°C.

Para calcular o número mínimo de módulos, usa-se a tensão de mínima de operação ( $V_{SPPMIX}$ ), que é dada pelo datasheet, e esse valor deve ser dividido pela tensão de máxima potência quando o módulo está operando em sua temperatura máxima. A temperatura máxima considerada neste trabalho é de 70°C.

Ao realizar estes cálculos, foram obtidos os seguintes resultados para o número mínimo e máximo de módulos em série:

$$4,18 < N^{\circ} \text{módulos série} < 5,88$$

Portanto serão usados 5 módulos em série devido a estes resultados obtidos.

Para calcular o número de fileiras em paralelo, usa-se a Equação (2) para calcular  $P_m$ , e em seguida é usado este resultado para calcular o número de fileiras em paralelo de acordo com a Equação (4). Desse modo, o número de fileiras em paralelo será de:

$$N^{\circ} \text{Fileiras paralelo} = 60$$

Portanto, será necessário a quantidade de 300 módulos para suprir a demanda energética a ser armazenada nas baterias durante o dia.

Modelo: Painel Solar Fotovoltaico 550Wp - Sunova SS-550-72-MDH

Quantidade: 300

Valor unitário = R\$ 1250,10

Valor Total = R\$ 375030,00

#### 4.2.3 Dimensionamento do controlador de carga

Para escolher a quantidade e qual controlador de carga deve ser usado, deve-se verificar qual será a corrente das fileiras em paralelo. Esta é calculada de acordo com a Equação (10).

$$I_c = 1047A$$

Portanto serão utilizados 15 controladores de carga de 70A em paralelo.

Modelo: Smartsolar MPPT 250V 70A 12/24/48V TR Smart Energy (- ver Figura 8 -)

Quantidade: 15

Valor unitário: R\$ 5921,23.

Valor Total: R\$ 88818,45.

**Figura 8 - Controlador carga bateria solar Victron**



Fonte: Amazon (2022)

#### 4.2.4 Dimensionamento do banco de bateria

Para dimensionar o banco de bateria será considerado o seguinte modelo de bateria: Bateria de Lítio Unipower 48V-100Ah UPLFP48-100. A Figura (9) mostra a aparência física da bateria.

**Figura 9 - Bateria de lítio usada no dimensionamento**



Fonte: Neosolar (2022)

Para dimensionar a quantidade de baterias requeridas para suprir a demanda de energias tem-se que definir os requisitos de funcionamento do projeto. Sabe-se que o banco de baterias irá atuar durante o período de 3 horas por dia no período das 18 às 21 horas.

Usando o valor de  $Li$ , obtido na subseção 4.2.1, calcula-se a capacidade do banco de baterias de acordo com a Equação (6).

$$CB = 2560\text{kWh}$$

Foi usado para os cálculos 4 dias de autonomia e 80% de profundidade de descarga.

E a capacidade do banco em Ah é dada pela Equação (7).

$$CBI = 54kAh$$

Após o cálculo do quanto de energia será acumulada pelo banco de baterias, determina-se o número de baterias em paralelo, dado pela Equação (8).

$$N^{\circ} \text{ baterias paralelo} = 540$$

Não será necessário o uso de baterias em série, visto que a tensão da bateria escolhida será a mesma tensão do banco de baterias.

Modelo da bateria: Bateria de Lítio Unipower 48V-100Ah UPLFP48-100

Quantidade: 540

Valor unitário: R\$ 10349,10

Valor final: R\$ 5588514,00

#### 4.2.5 Dimensionamento do inversor

A maior demanda registrada durante o horário de ponta foi de  $430,27kW$ . Por segurança, foi usado o valor de  $450kW$  (que é a demanda contratada pela UTFPR). Portanto, serão necessárias 45 unidades de inversores de frequência *off-grid* atuando em paralelo. A Figura (10) mostra a aparência física do modelo escolhido.

Modelo: Quattro 10.000VA 48V/230V senoidal pura + carregador

Quantidade: 45

Valor unitário: R\$ 17.295,76

Valor final: R\$ 778.388,75

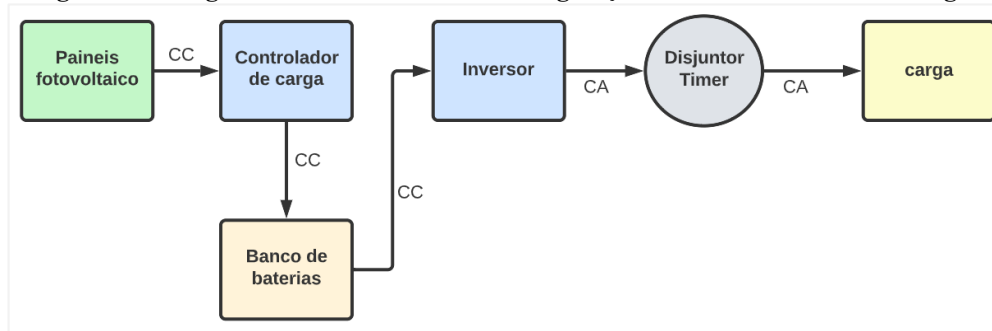
**Figura 10 - Inversor de frequência off-grid Victron**



Fonte: Eletromalu (2022)

#### 4.2.6 Diagrama de blocos e esquema do projeto

**Figura 11 - Diagrama de blocos do sistema de geração e armazenamento de energia**



Fonte: Do autor

A Figura (11) mostra os elementos que compõem o sistema projetado neste trabalho, nesta pode-se ver que os painéis interagem apenas com os controladores de carga. Os controladores têm a função gerenciar o carregamento das baterias, enquanto que o inversor é o responsável por converter a energia de corrente contínua para corrente alternada. A função do timer é gerenciar o momento no qual a energia armazenada será utilizada pelas cargas da unidade consumidora. Este trabalho propõe que este momento seja o horário de ponta.

**Tabela 4 - Elementos e dispositivos do projeto**

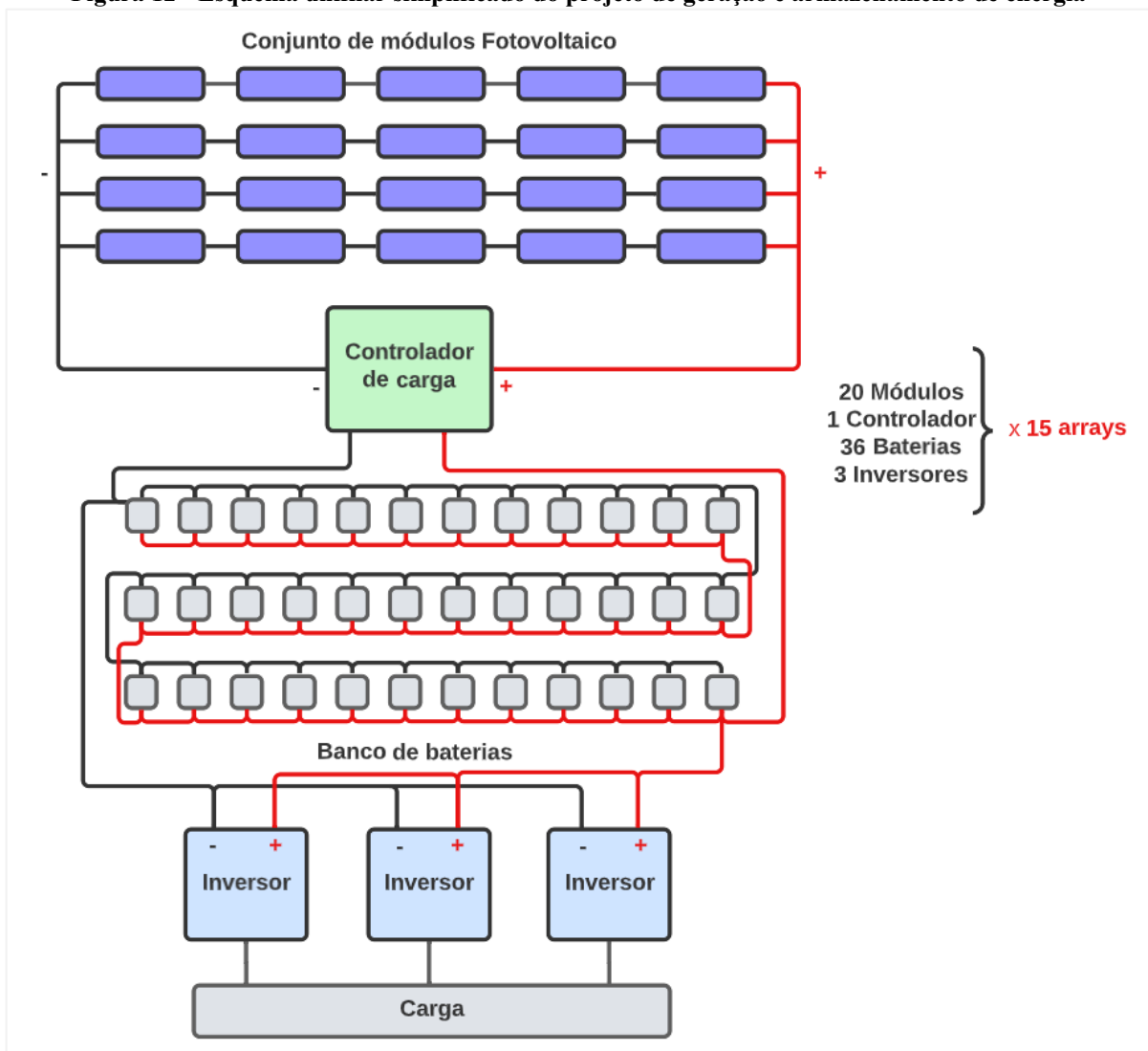
<b>Elementos</b>	<b>Quantidade</b>
Painéis fotovoltaico	300
Controlador de carga	15
Inversor	45
Baterias	540

Fonte: Do autor

A Tabela (4) mostra o resumo dos resultados do dimensionamento dos elementos que irão compor o sistema de geração e armazenamento de energia.

A instalação deste projeto será executada por meio de 15 subsistemas em paralelo. Cada subsistema deverá conter: 1 controlador de carga; 4 fileiras em paralelo constituída cada uma por 5 módulos em série; 3 inversores em paralelo; 36 baterias em paralelo. Essas informações podem ser vistas na Figura (12).

**Figura 12 - Esquema unifilar simplificado do projeto de geração e armazenamento de energia**



Fonte: Do autor

A tabela (5) mostra o custo aproximado total dos elementos dimensionados neste trabalho, salienta-se que não foi levado em consideração os custos de logística, instalação, proteção e climatização.

**Tabela 5 - Custo aproximado do projeto**

<b>Elementos</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor Unitário</b>	<b>Valor Total</b>
Painéis fotovoltaico	300	R\$ 1.250,10	R\$ 375.030,00
Controlador de carga	15	R\$ 5.921,23	R\$ 88.818,45
Inversor	45	R\$ 17.295,76	R\$ 778.309,20
Baterias	540	R\$ 10.349,10	R\$ 5.588.514,00
Total			R\$ 6.830.671,65

**Fonte: Do autor**

## **5 CONCLUSÃO**

Este trabalho teve por objetivo realizar o dimensionamento de um sistema de geração e armazenamento de energia. Essa energia será usada durante o horário de ponta. A energia gerada é proveniente de um sistema de 300 módulos fotovoltaico que estão divididos em 15 subsistemas que contém 20 módulos, cada subsistema contém um controlador de carga, 36 baterias e 3 inversores de frequência. Para o dimensionamento destes elementos foram considerados os dados de consumo e demanda de energia de ponta do ano de 2019. Estes dados foram trazidos para o presente corrigindo a valor do preço de energia praticados atualmente pela concessionária que distribui energia no estado do Paraná.

Este projeto prevê que o banco de baterias entre em operação durante o período das 18h às 21h, no entanto não está no escopo deste trabalho o projeto de controle automático desta operação. Um outro aspecto relevante a ser mencionado é que o local onde as baterias e os equipamentos serão armazenados deverá ser climatizado, portanto será necessário um projeto de climatização para controlar a temperatura ambiente.

Este projeto de dimensionamento considerou apenas o uso das baterias de lítio, por considerar que os seus benefícios em relação à durabilidade e segurança são fatores que têm maior peso de valor agregado. Porém, essa bateria tem um alto custo financeiro, mas salienta-se que o valor levantado por este trabalho é praticado por revendedores e, que devido a quantidade de 540 baterias obtidas como resultado do dimensionamento, seria mais favorável entrar em contato diretamente com o fabricante para obter preços mais atrativos. Os mesmos se aplicam para os demais elementos. É importante dizer que não está no escopo deste trabalho fazer o levantamento de custos e viabilidade econômica, entretanto foi feito adicionalmente um



levantamento do valor financeiro de cada elemento e o custo total aproximado obtido com o dimensionamento é de R\$ 6.830.671,65. Onde 82% desse valor reflete ao custo das baterias.

Um dos fatores que mais pesou no custo das baterias foi a imposição de requerer 4 dias de autonomia para a bateria. Ao passo que se ao invés de 4 dias fosse requerido 2 dias de autonomia, então o número de baterias cairia pela metade, resultando na economia de R\$ 2.79.4257,00. Ou para aumentar a vida útil das baterias, poderia diminuir a profundidade de descarga para 50%, pois com este valor a vida útil das baterias poderia passar de 25 anos. Portanto, fica claro que os dias de autonomia e a profundidade de descarga da bateria pode influenciar diretamente na viabilidade do projeto.

## REFERÊNCIAS

ANEEL. **Resolução normativa N° 414 / 2010**. Brasília: Agência nacional de Energia Elétrica, 2010.

AMAZON. **Controlador de carga**. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Victron-Energy-SmartSolar-controlador-Bluetooth/dp/B08LBWKXWH?th=1>. Acesso em: 14 mai. 2022.

ARAÚJO, Ericka. **Copel pesquisa novo sistema de gerador fotovoltaico híbrido**. Canal solar, 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/copel-pesquisa-novo-sistema-de-gerador-fotovoltaico-hibrido/>. Acesso em: 18 ago. 2021.

BRASIL, Ministério da Economia. **Como Analisar Gastos com Energia Elétrica**. s.d. Disponível em: [https://www.gov.br/compras/pt-br/sistemas/arquivos-doc-e-pdf/cartilha\\_energia.pdf](https://www.gov.br/compras/pt-br/sistemas/arquivos-doc-e-pdf/cartilha_energia.pdf). Acesso em: 01 ago. 2021.

CARNEIRO, Joaquim. **Módulos Fotovoltaicos: Características e Associações**. 2010. Uminho, Azurém, 2010. Disponível em: [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16961/1/M%C3%B3dulos%20Fotovoltaicos\\_Caracteristicas%20e%20Associa%C3%A7%C3%B5es.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16961/1/M%C3%B3dulos%20Fotovoltaicos_Caracteristicas%20e%20Associa%C3%A7%C3%B5es.pdf). Acesso em: 03 ago. 2021.

CLEAN TECHNICA. **Battery Lifetime: How Long Can Electric Vehicle Batteries Last?**. Disponível em: <https://cleantechnica.com/2016/05/31/battery-lifetime-long-can-electric-vehicle-batteries-last/>. Acesso em: 25 abr. 2022.

COPEL, Companhia Paranaense de Energia. **Tarifa Horária Verde: Subgrupo A4**. 2019. Disponível em: <https://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2F0a363cf546237cc203257488005939ce>. Acesso em: 01 ago. 2021.

COPEL, Companhia Paranaense de Energia. **Tarifas de Energia da COPEL**. 2019. Disponível em: <https://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2Fb2f4a2f0687eb6cf03257488005939b9>. Acesso em: 01 ago. 2021.

CORREIA, Tiago Barros. **A vez dos recursos de armazenamento no setor elétrico**. Brasil Energia, 2021. Disponível em: <https://editorabrasilenergia.com.br/a-vez-dos-recursos-de-armazenamento-no-setor-eletrico/>. Acesso em: 28 jul. 2021.

CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito). **Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica**. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=321](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321). Acesso em: 29 jun. 2021.

ELETROMALU. **Inversor de frequência off-grid Victron**. Disponível em: <https://www.eletromalu.com.br/inversor-solar-fotovoltaico-off-grid-quattro-10kva-48v-230v-senoidal-puracarregador-qua481030010>. Acesso em: 11 mai. 2022.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Sistemas de Armazenamento em Baterias- Aplicações e Questões Relevantes para o Planejamento. **Normas técnicas**. 29 nov. 2019. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-441/EPE-DEE-NT-098\\_2019\\_Baterias%20no%20planejamento.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-441/EPE-DEE-NT-098_2019_Baterias%20no%20planejamento.pdf). Acesso em: 28 jul. 2021.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**. São Paulo: GEPEA - POLI USP. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod\\_resource/content/2/Apostila\\_solar.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf). Acesso em: 30 jul. 2021.

FILHO, Aroldo José Teixeira de Souza. **Análise de viabilidade do sistema híbrido biogás-solar na geração de energia e seus impactos nas emissões de gases**. 2019. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde, 2019.

FREITAS, Bruna Nunes. **Análise de um sistema fotovoltaico de geração distribuída com bateria integrada de alto desempenho**. 2017. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2017.

GANDARA, Sabrina da Silva Santos; NUNES, Jeziel da Silva. **Pedidos de Patente de Tecnologias de Conversão e Armazenamento Eletroquímico de Energia Usando Nanotecnologia**. Rio de Janeiro: INPI, 2012. Disponível em: [https://www.gov.br/inpi/pt-br/assuntos/informacao/arquivos/estudo\\_tec\\_de\\_conv\\_e\\_armaz\\_nano.pdf](https://www.gov.br/inpi/pt-br/assuntos/informacao/arquivos/estudo_tec_de_conv_e_armaz_nano.pdf) Acesso em: 28 jul. 2021.

GRIMONI, José Aquiles Baesso. **Energia Solar Fotovoltaica**. São Paulo: PEA-EPUSP, 2019. Disponível em: <http://paineira.usp.br/sisea/wp-content/uploads/2019/03/Energia-Solar-Fotovoltaica-pme3561.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2021.

JUNIOR, Wanderley Paris; *et al.* Levantamento da geração distribuída compartilhada no Brasil. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XV., 2008, Bauru. Anais, Belo Horizonte: Poisson, 2021. p. 169 – 181 Disponível em: <https://www.poisson.com.br/livros/energia/volume1/>. Acesso em: 28 jul. 2021.

LIMA, Flávia. **Conceitos básicos de eletrotécnica aplicada – parte 3**. O Setor Elétrico, Cidade, 7 jun. 2021. Disponível em: <https://osetoreletrico.com.br/conceitos-basicos-de-eletrotecnica-aplicada-a-curva-de-carga/>. Acesso em: 02 ago. 2021.

LINDEN, D; REDDY, T. B. **Linden's Handbook of Batteries**. 4. ed. NY - EUA: McGraw Hill, 2010. p. 1-219.

KESHAN, H; THORNBURG, J; USTUN, T. S. Comparison of lead-acid and lithium ion batteries for stationary storage in off-grid energy systems. **4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016)**, Kuala Lumpur, Malaysia, p. 1-7, nov./2016.

MATIAS, Jefferson Augusto Cardozo. **Viabilidade Técnica e Econômica da Utilização de Sistemas Fotovoltaicos com Armazenamento em Baterias**. 2018. 74 f. Especialização em Eficiência Energética – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

MEIRA, Guilherme Campanerutti. **Estudo de geração fotovoltaica em uma tornearia**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2021.

MELO, Hercílio Gomes de. **Eletroquímica e Corrosão**. São Paulo: POLI USP. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5439833/mod\\_resource/content/1/apostila-2020%20Eletroq%20%20e%20Corros%C3%A3o.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5439833/mod_resource/content/1/apostila-2020%20Eletroq%20%20e%20Corros%C3%A3o.pdf). Acesso em: 23 ago. 2021.

MORI, Vânia; SANTOS, Ronaldo Luiz Correa dos; SOBRAL, Luiz Gonzaga Santos. **Metalurgia do silício: processos de obtenção e impactos ambientais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/328/1/sta-41.pdf> Acesso em: 29 jun. 2021.

NASCIMENTO, F. P. D. **Metodologia da Pesquisa Científica: teoria e prática – como elaborar TCC**. 1. ed. BA, BR: Thesaurus, 2006. p. 1-180.

PINHO, João Tavares; *et al.* **Sistemas híbridos: Soluções energéticas para a Amazônia**. 1ª. Ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. Disponível em: [https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes\\_Energeticas\\_para\\_a\\_Amazonia\\_Hibrido.pdf](https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes_Energeticas_para_a_Amazonia_Hibrido.pdf). Acesso em: 10 ago. 2021.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPTEL-CRESESB, 2014.

STAN, A. I. *et al.* A comparative study of lithium ion to lead acid batteries for use in UPS applications. **2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)**, Vancouver, BC, Canada, v. 1, n. 1, p. 1-8, out./2014.

STERZELECKI, Gustavo Remi Carneiro. **Tecnologias de armazenamento de energia elétrica e sua integração com sistemas fotovoltaicos de pequeno e médio porte**. 2018. 101f. Trabalho de Conclusão de Curso da Especialização em Energias Renováveis – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

VALLE, J. A. D. Analysis of Advanced Lithium-Ion Batteries for Battery Energy Storage Systems. **2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering**, Palermo, Italy, v. 1, n. 1, p. 1-7, mai./2022.

UNIPOWER. **Bateria de lítio** . Disponível em: <https://unipower.com.br/produto/bateria-de-litio-48v-100ah-uplfp48-100/>. Acesso em: 17 mai. 2022.

VINTURINI, Mateus. **Armazenamento de energia: tecnologias de baterias elétricas**. Canal solar, 2021. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/armazenamento-de-energia-tecnologias-de-baterias-eletricas/>. Acesso em: 12 ago. 2021.