



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



RAYSSA FERREIRA ALENCAR

ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE
ACUMULADORES ÍON-LÍTIO E CHUMBO-ÁCIDO PARA USO NA
ENERGIA SOLAR RESIDENCIAL *OFF-GRID*

JOÃO PESSOA – PB
FEVEREIRO – 2022

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO N° 88

RAYSSA FERREIRA ALENCAR

**ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE
ACUMULADORES ÍON-LÍTIO E CHUMBO-ÁCIDO PARA USO NA
ENERGIA SOLAR RESIDENCIAL *OFF-GRID***

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador(a)

Dr(a). Flávia de Medeiros Aquino

Co- Orientador

Dr. Francisco Fechine Borges

JOÃO PESSOA – PB

FEVEREIRO – 2022

RAYSSA FERREIRA ALENCAR

**ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE
ACUMULADORES ÍON-LÍTIO E CHUMBO-ÁCIDO PARA USO NA
ENERGIA SOLAR RESIDENCIAL *OFF-GRID***

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Dr(a). FLÁVIA DE MEDEIROS AQUINO

Orientador(a)

UFPB

Dr. FRANCISCO FECHINE BORGES

Co- orientador

IFPB

Dr.(a) KELLY CRISTIANE GOMES DA SILVA

UFPB

JOÃO PESSOA – PB

FEVEREIRO – 2022

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A368e Alencar, Rayssa Ferreira.

Estudo comparativo de desempenho entre acumuladores íon-lítio e chumbo-ácido para uso na energia solar residencial off-grid / Rayssa Ferreira Alencar. - João Pessoa, 2022.

80 f. : il.

Orientação: Flávia de Medeiros Aquino.

Coorientação: Francisco Fachine Borges.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Energia solar. 2. Baterias chumbo-ácido. 3. Íon-lítio - Sistemas fotovoltaicos. 4. Energia elétrica - Off-grid - Eficiência. I. Aquino, Flávia de Medeiros. II. Borges, Francisco Fachine. III. Título.

UFPB/BC

CDU 502.21:523.9(043)



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

ATA nº 88 da Sessão de Defesa Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba.

Ao vigésimo primeiro dia do mês de fevereiro de dois mil e vinte e dois foi instalada a Banca de Defesa de Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas, as 14h00, de forma remota <https://meet.google.com/rsm-nyiu-tmk> (Google Meet) que se submeteu a defesa pública de RAYSSA FERREIRA ALENCAR, matrícula 20191011839, com o título “**ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE ACUMULADORES ÍON-LÍTIO E CHUMBO-ÁCIDO PARA USO NA ENERGIA SOLAR RESIDENCIAL OFF-GRID**”. A Comissão Examinadora esteve constituída pelos professores: FLAVIA DE MEDEIROS AQUINO (UFPB), KELLY CRISTIANE GOMES DA SILVA (UFPB), e FRANCISCO FECHINE BORGES (IFPB). Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, o(a) candidato(a) foi **APROVADA** pela Comissão Examinadora. E, para constar, foi lavrada a presente ata, assinada pelos membros da Comissão.

Observações: *A aluna deverá fazer as correções sugeridas pela banca no prazo compreendido da Resolução da PPGER.*

Membros da Banca Examinadora:

Flávia de Medeiros Aquino

Prof. Dra. FLAVIA DE MEDEIROS AQUINO
Orientador(a)

Kelly Cristiane Gomes

Prof. Dra. KELLY CRISTIANE GOMES DA SILVA - UFPB
Examinador(a) Interno(a)

Francisco Fechine Borges

Prof. Dr. FRANCISCO FECHINE BORGES - IFPB
Examinador(a) Externo(a)

PPGER/CEAR/UFPB - Campus I, Caixa Postal 5115, CEP: 58051-900, João Pessoa - PB, Brasil.

Obs.(1): O discente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 45 dias a contar da data da defesa, os exemplares definitivos da dissertação.

Obs.(2): O docente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 20 dias a contar da data da defesa, o relatório de orientação para avaliação do colegiado.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, *Socorro e Clóvis*, por sempre
acreditarem em mim.

À meu marido *Dennis*, por sua preocupação,
carinho e incentivo.

À minha avó *Nevinha* (in memoriam), que desde
sempre me dizia que eu estudava demais.

À todos os meus colegas de trabalho
por todo amor, incentivo,
apoio e compreensão.

Nada disso teria sentido se
vocês não existissem na minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida e por me permitir realizar tantos sonhos nesta existência. Obrigado por me permitir errar, aprender e crescer, por Sua eterna compreensão e tolerância, por Seu infinito amor, pela Sua voz “invisível” que não me permitiu desistir e principalmente por ter me dado uma família tão especial, enfim, obrigado por tudo. Ainda não descobri o que eu fiz para merecer tanto.

A Prof. Flávia, pela orientação, competência, profissionalismo e dedicação tão importantes, embora eu chegasse desestimulada, bastavam alguns minutos de conversa e umas poucas palavras de incentivo e lá estava eu novamente. Obrigado por acreditar em mim e pelos incentivos. Tenho certeza que não chegaria neste ponto sem o seu apoio. Você foi e está sendo muito mais que orientadora: para mim será sempre mestre e amiga.

Aos membros da banca examinadora, Prof^ª Kelly e Prof. Fechini, que tão gentilmente aceitaram participar e colaborar com esta dissertação. À Prof^ª Kelly, agradeço pela disponibilidade e apontamentos de melhoria. Ao Professor Fechine, pela dedicação, competência, apoio e todo conhecimento compartilhado.

Agradeço também a todos os meus colegas de trabalho, que sempre acreditaram em mim, e sempre me incentivaram.

À minha mãe e ao meu pai deixo um agradecimento especial, por todas as lições de amor, companheirismo, amizade, caridade, dedicação, abnegação, compreensão e perdão que vocês me dão a cada novo dia. Sinto-me orgulhoso e privilegiado por ter pais tão especiais.

À meu esposo Dennis, por todo amor, carinho, compreensão e apoio em tantos momentos difíceis desta caminhada. Obrigado por permanecer ao meu lado, mesmo sem os carinhos rotineiros, sem a atenção devida e depois de tantos momentos de lazer perdidos. Obrigado pelo presente de cada dia, pelo seu sorriso e por saber me fazer feliz.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, o meu sincero agradecimento.

RESUMO

As energias limpas e renováveis têm sido cada vez mais importantes para o progresso do desenvolvimento descentralizado. No Brasil, a autogeração colocou os consumidores residenciais no centro da expansão fotovoltaica e para isso, cresce o número de estudos envolvendo acumuladores para geração desse tipo de energia. As baterias de chumbo-ácido e íon-lítio são dispositivos amplamente utilizados para armazenamento de energia, como por exemplo, geração de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos autônomos residenciais *off-grid*. Esta pesquisa apresentou o desenvolvimento de um sistema prototipado próprio para análise de desempenho de dois tipos de bancos de baterias, uma de chumbo-ácido (CA) e outra de íon-lítio (LI), através da medição de dados de queda de tensão quando as baterias são descarregadas. Foram utilizadas baterias de CA de 14 A e LI de 10,4 A, aplicando a proporcionalidade entre elas, notou-se, após os testes, medições e análise de dados, que nas duas baterias as quedas de tensão, na faixa estudada, aproximadamente lineares. Com os resultados e incluindo-se as questões técnicas (capacidade, confiabilidade) e comerciais (preço, disponibilidade) e as condições aplicadas, a bateria de chumbo-ácido é a mais recomendada para ser utilizada em sistemas envolvendo acumuladores para geração de energia *off-grid*.

Palavras-chave: Baterias chumbo-ácido; íon-lítio, energia solar, off-grid, eficiência.

ABSTRACT

Clean and renewable energies have been increasingly important for the progress of decentralized development. In Brazil, self-generated power has placed residential consumers at the center of photovoltaic expansion and, for that, the number of studies involving accumulators for the generation of this type of energy is growing. Lead-acid and lithium-ion batteries are widely used devices for energy storage, such as electricity generation in off-grid residential autonomous photovoltaic systems. This research has presented the development of a prototype system proper for the performance analysis of two types of battery banks, one of lead-acid (LA) and another of lithium-ion (LI), by measuring voltage drop data when the batteries are discharged. LA batteries of 14 A and LI batteries of 10.4 A were used and the proportionality between them was applied. After the tests, measurements and data analysis it was noticed that, in the studied range, the voltage drops in the two batteries were linear. With the results and including the technical (capacity, reliability) and commercial (price, availability) issues and the conditions applied, the lead-acid battery is the most recommended to be used in systems involving accumulators for off-grid energy generation.

Keywords: Lead-acid batteries; lithium-ion; solar power; off-grid; efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Capacidade anual de instalações dos principais mercados fotovoltaicos entre 2012 - 2017 em GW.	16
Figura 2: Geração de energia fotovoltaica solar no cenário de desenvolvimento sustentável, 2000-2030 em GW.	17
Figura 3: PIB e oferta interna de energia do Brasil – 2000 a 2018.	18
Figura 4: Cinturão Solar.	19
Figura 5: Usinas fotovoltaicas de Angico I e Malta (a), em jul/2019; Complexo Coremas (b), em nov/2018.	20
Figura 6: Modelo de sistema de geração distribuída de energia solar fotovoltaica on-grid.	21
Figura 7: Modelo de sistema de geração distribuída de energia solar fotovoltaica off-grid.	21
Figura 8: Esquema de um módulo fotovoltaico (genérico).	23
Figura 9: Inversor de frequência on-grid.	23
Figura 10: Bateria de chumbo-ácido, tipo estacionária.	24
Figura 11: Controlador de carga.	25
Figura 12: Desenho esquemático de uma bateria chumbo/ácido.	27
Figura 13: Desgaste de uma bateria chumbo-ácido em função da profundidade.	28
Figura 14: Desgaste de uma bateria chumbo-ácido em função da temperatura.	29
Figura 15: Esquema dos processos eletroquímicos que ocorrem na bateria íon-lítio, descarga e carga.	30
Figura 16: Porcentagem de vida útil vs. temperatura de operação de uma bateria de chumbo-ácido.	32
Figura 17: Comparação da capacidade de retenção, em diferentes temperaturas, entre eletrólitos otimizados e convencionais.	32
Figura 18: Mudança na capacidade máxima e percentual de degradação de bateria de íon-lítio testada.	33
Figura 19: Modos de operação ideais em um regime de carga.	34
Figura 20: Influência de diferentes <i>DoD</i> na vida útil das baterias de chumbo-ácido.	36
Figura 21: Capacidade total usada em diferentes atividades para um período de um mês.	37
Figura 22: Comportamento da tensão elétrica de uma bateria de chumbo-ácido de 12 V na descarga.	38
Figura.23: Comportamento da tensão elétrica de uma bateria de íon-lítio de 12,8 V nos ciclos de carga-descarga.	39
Figura 24: Etapas e prazos do procedimento de acesso que devem ser seguidos pelo consumidor	

e pela distribuidora.	44
Figura 25: Painel solar fotovoltaico Sinosolar SA30-36P	46
Figura 26: Disjuntor Lukma/ DZ47/ Unipolar/ 63A	47
Figura 27: Controlador de carga solar fotovoltaico PWM RBL-30A-LI 30A	47
Figura 28: Bateria de Chumbo-ácido selada.	49
Figura 29: Exemplos de valores de descarga estabelecidos pelo fabricante.	50
Figura 30: Ciclos de carga e descarga em função da profundidade de descarga	50
Figura 31: Pack de Bateria íon-Lítio BAP energy 18.650	51
Figura 32: Esquema de ligação das células no Pack de Bateria íon-lítio	52
Figura 33: Interruptor Simples	53
Figura 34: Lâmpada Avant 12 VDC 7W Branca	53
Figura 35: Sensor de corrente, tipo Hall, modelo ACS712 (até 5 A)	54
Figura 36: Especificações do sensor ACS 712	54
Figura 37: Multímetro digital Hikari HM-1001	55
Figura 38: Arduino UNO R3	55
Figura. 39: Código elaborado no ambiente Arduino	56
Figura 40: Esquema do divisor de tensão utilizado	57
Figura 41: Protoboard 830 pontos	58
Figura 42: Cabos jumper macho-macho	58
Figura 43: Sistema proposto	59
Figura 44: Diagrama de blocos do sistema montado chumbo-ácido (CA)	59
Figura 45: Diagrama de blocos do sistema montado lítion-íon (LI)	60
Figura 46: Sistema de monitoramento de correntes e tensões	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Com os 7 valores de pesquisa na internet da bateria CA.	64
Tabela 2: Com os 7 valores de pesquisa na internet da bateria LI.	64

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

DoD - Depth of Discharge

CA - chumbo-ácido

LI - íon-lítio

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY

SoC - State of Charge

SCEE -Compensação de Energia Elétrica

IPI - Imposto sobre Produtos Industrializados

PERS - Programa de Energia Renovável Social

TE - Tarifa de Energia

TUSD - Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Tensão da bateria chumbo-ácido e do íon-lítio média geral dos sete dias.	62
Gráfico 2: Corrente da bateria chumbo-ácido e do íon-lítio média geral dos sete dias.	62

SUMÁRIO

Página

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	14
3 REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1 A energia solar no Mundo, no Brasil e na Paraíba.....	14
3.1.1 Energia solar on-grid e <i>off-grid</i> no Brasil.....	20
3.1.1.1 Componentes do sistema de energia solar <i>off-grid</i> e <i>on-grid</i>	22
3.1.2 Acumuladores chumbo-ácido.....	26
3.1.3 Acumuladores íon-lítio.....	29
3.1.4 Temperatura de Operação.....	30
3.1.5 Regime de Carga e Descarga.....	33
3.1.6 Número de Ciclos.....	35
3.1.7 Capacidade Energética das Baterias.....	36
3.1.8 Tensão e Corrente.....	38
3.1.9 Segurança no uso de acumuladores.....	40
3.1.10 Política de incentivos fiscais no Brasil (legislação).....	40
4 MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1 Sistema de simulação.....	45
4.1.1 Materiais utilizados.....	46
4.1.1.1 Pannel solar 30 W.....	46
4.1.1.2 Disjuntor.....	47
4.1.1.3 Controlador de Carga solar fotovoltaico.....	47
4.1.1.4 Baterias.....	48
4.1.2 Cabos condutores de energia.....	52
4.1.2.1 Interruptor da carga.....	52
4.1.2.2 Carga (lâmpadas).....	53
4.1.2.3 Sensor de corrente.....	54
4.1.2.4 Multímetro.....	54
4.1.2.5 Arduíno.....	55
4.1.2.6 Sistema de monitoramento.....	56
4.1.2.7 Divisor de tensão.....	57
4.1.2.8 Protoboard.....	58
4.1.3 Montagem e funcionamento do sistema.....	58
4.2 Metodologia utilizada.....	61
5. RESULTADOS	62
6 CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXO I	70
ANEXO II	71
ANEXO III	78

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da economia global acarreta um uso excessivo de energia fóssil convencional, como carvão e óleo. Para resolver o conflito entre a crescente demanda de energia e a energia fóssil, que é finita e está se exaurindo, países de todo o mundo têm voltado sua atenção para as energias renováveis. Em termos da capacidade global instalada, a energia solar fotovoltaica já se tornou a terceira maior energia renovável em utilização, seguida por hidrelétricas e energia eólica. Além disso, com o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica solar, o custo dos sistemas fotovoltaicos diminuiu 81% desde o final de 2009 (B.BAI, et al. 2019).

A principal razão para promover a energia solar fotovoltaica é que ela pode ajudar a mitigar as alterações climáticas, devido às suas baixas emissões de carbono no seu ciclo de vida, conforme demonstrado por vários estudos de avaliação do ciclo de vida (Wong et al., 2016). Ao se pensar em energia e sua distribuição, é comum a utilização de baterias, que são dispositivos nos quais a energia química é convertida em energia elétrica. Podem ser definidas como um conjunto de células que podem ser recarregadas, possuindo ciclos de vida longos. As baterias podem ser encontradas nas mais variadas combinações de íons metálicos, poli-metais, polímeros, cerâmicas e até mesmo ácido-metais (Carneiro, R. L. et al. 2017).

Uma maneira de otimizar o uso da eletricidade na energia solar, que depende da irradiação solar e do clima, é o uso de acumuladores/baterias como sistema de armazenamento para uso residencial (Hossaind et al, 2019). A bateria de chumbo- ácido é uma das opções atuais mais importantes em sistemas de armazenamento de energia solar. Outra tecnologia que também está sendo estudada para armazenamento de energia são os acumuladores de íon-lítio, que têm vantagens quanto à vida útil e na oferta e demanda de eletricidade (Fehmi, G. et al 2018).

Neste contexto, é importante compreender que a busca pela diversificação da matriz energética brasileira tem se tornado cada vez mais necessária por dois principais fatores. Primeiro pela diminuição das chuvas reduzindo a geração de energia por hidroelétricas e ainda pela necessidade de explorar novos recursos renováveis sustentáveis. Diante deste cenário, a energia solar fotovoltaica off-grid e on-grid tem evoluído e sendo explorada por importantes laboratórios em todo mundo. A busca por equipamentos e materiais mais duráveis nesse contexto, em específico as baterias vem sendo um desafio às empresas desse setor.

2. OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo geral

Fazer um estudo comparativo do uso de acumuladores chumbo-ácido (CA) e de íon-lítio (LI) em um sistema de energia solar residencial *off-grid*, comparando custos de aquisição, quantidade de energia armazenada, e eficiência dos sistemas.

2.1.2 Objetivos Específicos

- Montar um sistema solar fotovoltaico *off-grid* simulado para as baterias de chumbo-ácido e íon-lítio;
- Comparar as descargas de acumuladores CA e LI em um sistema solar *off-grid* montado, avaliando as variáveis tempos de descarga, tensões e correntes de descarga destes os dois acumuladores;
- Comparar custo/benefício dos acumuladores CA e LI do uso *off-grid* na energia solar dos acumuladores em estudo.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A energia solar no Mundo, no Brasil e na Paraíba

O crescimento mundial da energia fotovoltaica se deu de forma exponencial, entre os anos 1992 a 2017. Durante esse período, evoluiu de um nicho de mercado de aplicações de pequena escala para uma fonte de eletricidade convencional (IEA, 2018). Aliado a este crescimento, a energia solar fotovoltaica está em sintonia com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, notadamente o ODS N° 7, uma vez que o acesso à energia elétrica proporciona o exercício de outros direitos fundamentais.

Durante vários anos, o crescimento da energia solar fotovoltaica foi impulsionado principalmente pelo Japão e pelos países europeus, pioneiros nesta tecnologia. Como consequência, o custo da energia solar diminuiu significativamente, devido aos efeitos da curva de experiência, com o desenvolvimento da tecnologia e da economia (MAIA, 2018).

As energias renováveis, principalmente a solar fotovoltaica, tornaram-se uma alternativa energética para vários países, notadamente após o desastre nuclear de Fukushima, em 2011. Os alemães, por exemplo, intensificaram a desativação de suas usinas nucleares e deram início à implementação de fontes renováveis, com destaque para a eólica e a solar fotovoltaica.

O Japão, por outro lado, por não dispor de grande variedade de fontes energéticas, optou pelo mercado fotovoltaico, onde até o final de 2017, a capacidade acumulada do país era de 49 GW, a terceira maior capacidade instalada de energia solar fotovoltaica do mundo.

Ao longo da história, os Estados Unidos sempre estiveram entre os principais países geradores de energia solar fotovoltaica, no entanto, o Japão ultrapassou os Estados Unidos e foi o líder mundial de eletricidade solar fotovoltaica produzida até o ano de 2005, quando a Alemanha assumiu a liderança. Porém, os alemães foram ultrapassados pela China em 2015, que tornou-se o maior produtor mundial de energia fotovoltaica. Em 2017, os chineses foram os primeiros a superarem os 100 GW de capacidade fotovoltaica instalada. De acordo com a IEA (2018), as estimativas são de que a China continue líder em capacidade fotovoltaica instalada nas próximas décadas, seguida pela Índia e pelos EUA.

Após uma leve queda em 2014, o mercado fotovoltaico chinês cresceu cerca de 15,2 GW em 2015, 34,4 GW em 2016, e 53 GW em 2017. O relatório do IEA ressalta, ainda, que o mercado norte-americano diminuiu sua capacidade instalada, em 2017, passando de 14,7 GW para cerca de 10,6 GW. Por outro lado, a posição do terceiro lugar no mercado fotovoltaico foi finalmente assumida pela Índia, que instalou 9,1 GW, à frente do Japão e da Alemanha, que ficaram em quarto e quinto lugares no ranking, como apresentado na Figura 1 (IEA, 2018).

Além disso, a geração de energia solar distribuída tem sido considerada uma das tecnologias de eletricidade com crescimento mais rápido nos últimos anos, segundo a ABSOLAR (2018). Mudanças na tecnologia, na estrutura de custos, nas políticas de habilitação e nos marcos regulatórios, impulsionaram esse crescimento nos países desenvolvidos, principalmente na Alemanha.

Outros países, como o Reino Unido e a Austrália, têm demonstrado interesse na geração de energia solar fotovoltaica distribuída. O Reino Unido, por exemplo, de acordo com Buzatto (2017), anunciou um ambicioso projeto de energia solar fotovoltaica para a população de menor renda. Este projeto prevê instalar aproximadamente 800 mil painéis solares em moradias sociais da Inglaterra e País de Gales nos próximos anos, demonstrando o interesse nesta modalidade de geração fotovoltaica.

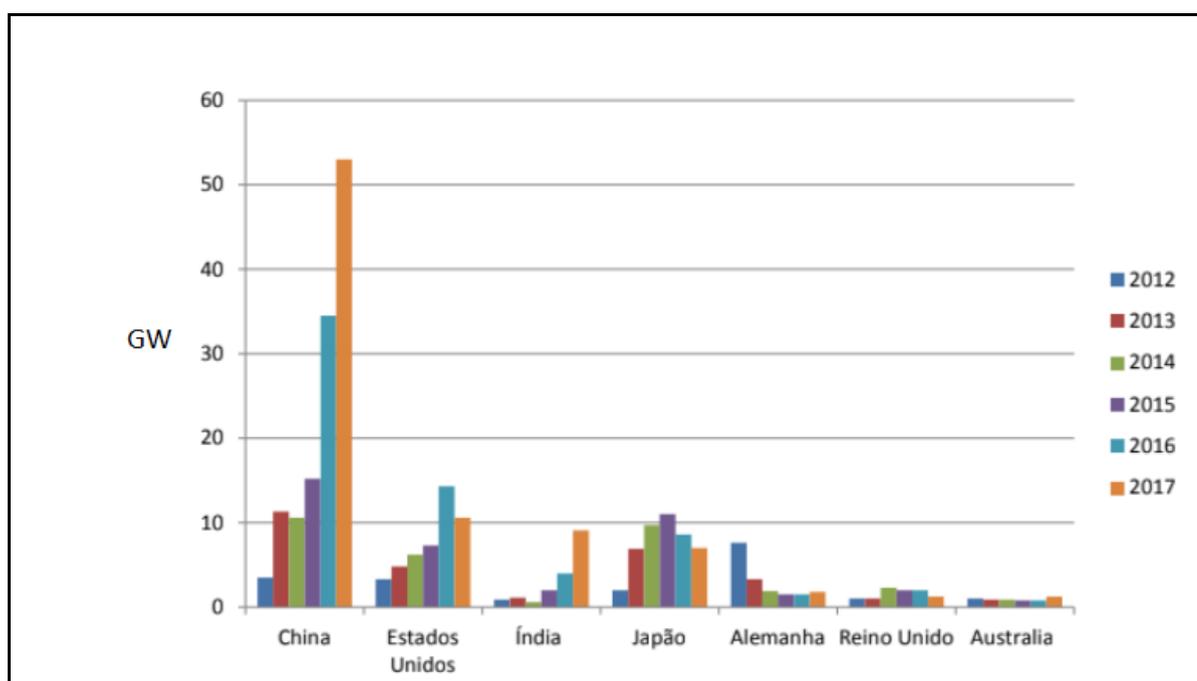


Figura 1. Capacidade anual de instalações dos principais mercados fotovoltaicos entre 2012 - 2017 em GW. Fonte: Adaptada dos relatórios do IEA.

A geração fotovoltaica solar aumentou 22% (+131 TWh) em 2019 e representou o segundo maior crescimento absoluto da geração de todas as tecnologias renováveis, um pouco atrás da energia eólica e à frente da energia hidrelétrica. Apesar da desaceleração do crescimento, devido às recentes mudanças políticas e incertezas na China causadas pela pandemia do COVID-19 (o maior mercado de energia fotovoltaica do mundo), 2019 foi um ano de crescimento global recorde na capacidade fotovoltaica. À medida que a competitividade continua a melhorar, a energia solar fotovoltaica ainda está caminhando para atingir os níveis previstos na SDS (*Sustainable Development Scenario*), o que exigirá um crescimento médio anual de 15% entre 2019 e 2030 (IEA, 2020).

Estima-se que a geração de energia elétrica a partir de energia solar fotovoltaica tenha aumentado 22% em 2019, para 720 TWh conforme mostra a Figura 2. Com esse aumento, a participação de energia solar fotovoltaica na geração global de eletricidade é, agora, cerca de 3%. Em 2019, a geração fotovoltaica superou a bioenergia e, agora, é a terceira maior tecnologia de eletricidade renovável, depois da energia hidrelétrica e eólica *onshore* (IEA, 2020).

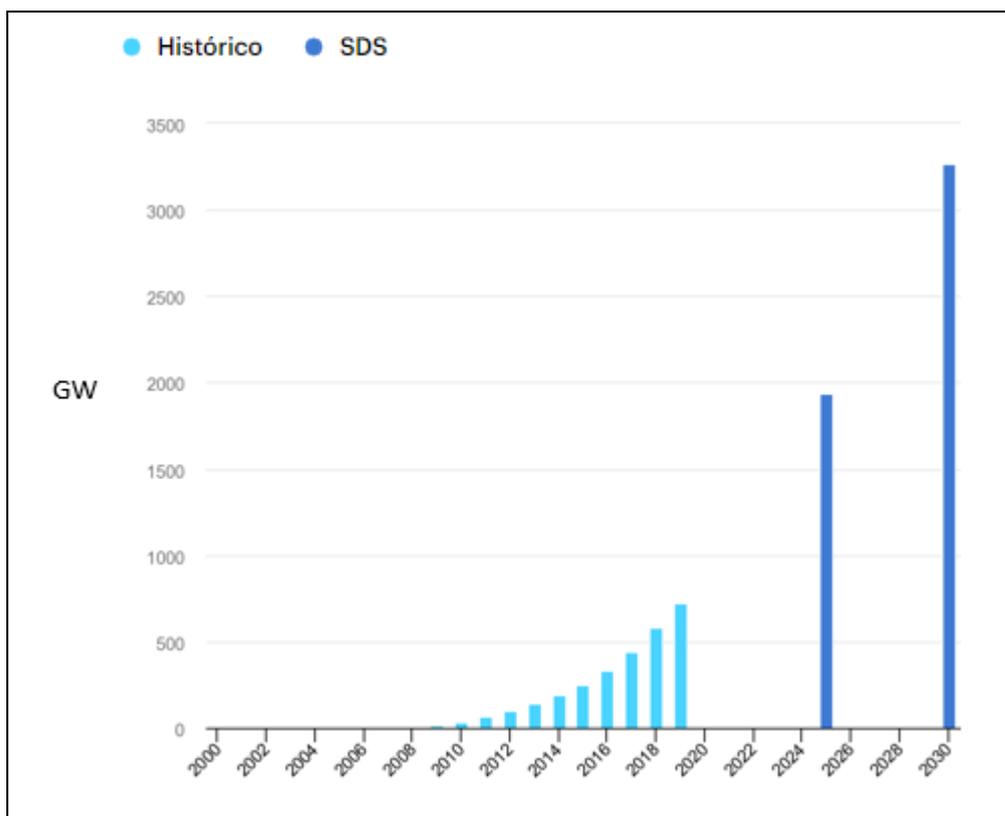


Figura 2. Geração de energia fotovoltaica solar no cenário de desenvolvimento sustentável, 2000-2030, em GW. Fonte: Adaptada dos relatórios do IEA (2020).

O crescimento econômico foi um dos fatores fundamentais no aumento da demanda energética, a partir de 1971, quando cada 1% de aumento do Produto Interno Bruto (PIB) global foi acompanhado de 0,6% de aumento no consumo de energia primária (GREENPEACE, 2007).

No Brasil, o consumo de energia também está relacionado à atividade econômica. A análise do histórico da economia é relevante para o entendimento sobre os movimentos de variação do consumo. No período compreendido entre 2001 e 2018, o Produto Interno Bruto (PIB) evoluiu a uma taxa média de 2,3% ao ano, acumulando um crescimento de cerca de 50%. Em relação à oferta interna de energia, esta cresceu no mesmo ritmo da economia (2,3% ao ano), mostrando forte correlação com o PIB (Figura 3).

Segundo dados do Sistema de Registro de Geração Distribuída (SISGD) da ANEEL, em outubro de 2019 o setor de serviços concentrava a maior parte da potência fotovoltaica instalada distribuída, com uma parcela de 43%, seguido do setor residencial, com 36%. Apesar de grande parte da autoprodução do setor de serviços pautar-se no uso de gás natural como combustível para geração de eletricidade, a geração distribuída com tecnologia solar fotovoltaica vem ganhando participação a cada ano.

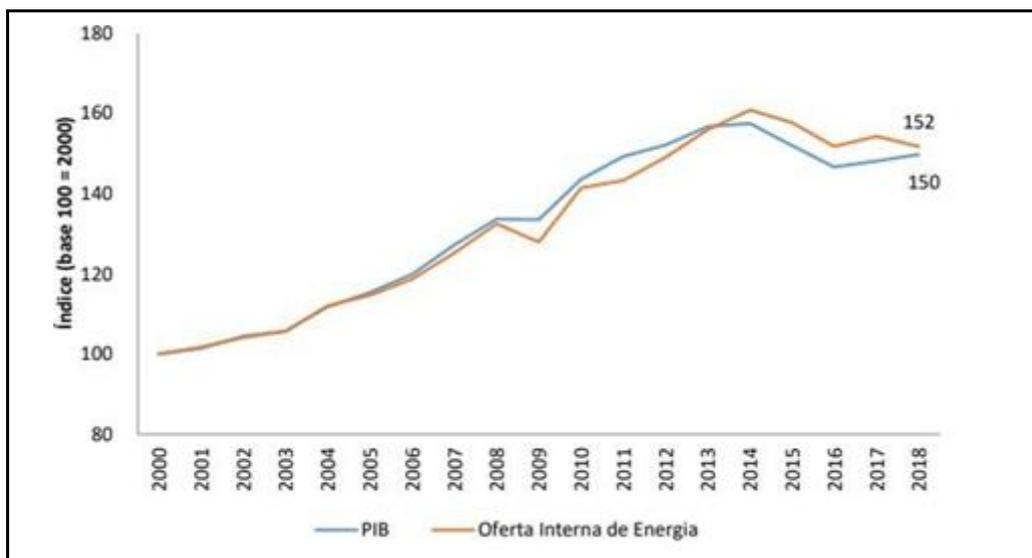


Figura 3. PIB e oferta interna de energia do Brasil – 2000 a 2018. Fonte: EPE, 2019.

No período 2010-2013, o aumento observado da renda média da população e a redução da desigualdade observada no período, em virtude das políticas sociais implementadas nos anos anteriores, associado a melhorias nas condições de acesso ao crédito, contribuíram para uma aceleração do aumento de posse e uso de eletrodomésticos nas residências brasileiras e crescimento da taxa de motorização da população. Como resultado, o consumo energético cresceu a uma taxa média anual de 5,1% neste período, tendo o PIB crescido a uma taxa de 4,1% ao ano. Neste período foram regulamentados diversos equipamentos no âmbito da Lei de Eficiência Energética, sendo os programas de meta aprovados em 2010 e 2011.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aponta o consumo de energia como um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida da sociedade, visto que reflete a dinâmica dos setores da economia e o poder de compra da população. Quando o poder de compra aumenta, a população investe em automóveis e aparelhos elétricos, aumentando a demanda por combustível e eletricidade (ANEEL, 2008).

A Paraíba está entre os 13 estados da federação com melhor potencial para geração distribuída, por meio de instalação de painéis fotovoltaicos em telhados residenciais (EPE, 2018). Possui condições bastante favoráveis para exploração do potencial de geração de energia solar, visto que parte de seu território, especialmente o sertão, está incluso no chamado “cinturão solar”, (Figura 4), faixa com os maiores níveis de irradiação solar do Brasil, que vai do Nordeste ao Pantanal (PIERRO, 2017).

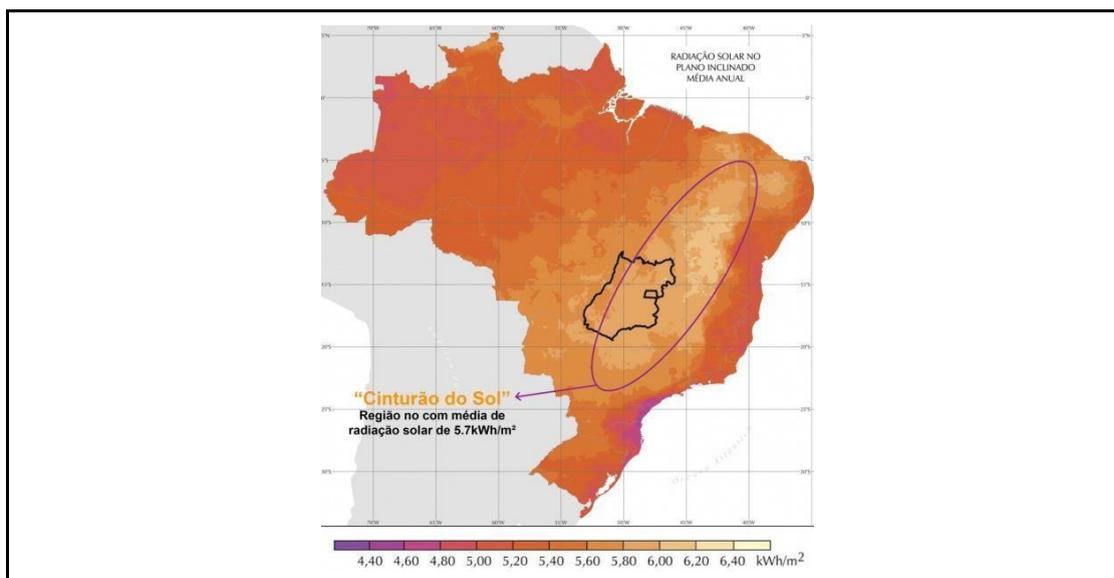


Figura 4. Cinturão Solar. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar. Imagem: INPE.

O Estado da Paraíba vem recebendo grandes investimentos em energias renováveis, inclusive com o uso da tecnologia fotovoltaica. Alguns exemplos desses investimentos são o complexo de geração de energia solar fotovoltaica de Coremas (Figura 5), já em construção, mas em contínua ampliação, com capacidade de, aproximadamente, 93 MWp (Megawatts-pico) em operação; e as usinas fotovoltaicas de Angico I e Malta (Figura 5), em construção, com capacidade de 27 MWp cada uma, situadas em Malta, sertão do estado (EPE, 2018).

Um exemplo destes investimentos é a Rio Alto que, segundo a empresa, “*com visão de futuro e ousadia, desafiou o mercado quando o Brasil enfrentava instabilidade, investindo em energia limpa e contribuindo com o desenvolvimento da cidade de Coremas, no sertão da Paraíba*”. Segundo o relatório sobre o futuro da produção de energia no mundo, divulgado anualmente pela Bloomberg New Energy Finance (BNEF), “*até 2040 a produção de energia solar e eólica vai superar a produção de energia hidrelétrica no Brasil*”.



Figura 5. Usinas fotovoltaicas de Angico I e Malta (a), em jul/2019; *Complexo Coremas (b)*, em nov/2018. Fonte: Weg, 2019.

3.1.1 Energia solar on-grid e *off-grid* no Brasil

Desde 2012, o Brasil vem discutindo algumas formas de incentivo à inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica nacional, por meio de um conjunto de elementos, como novas regulamentações e abertura de leilões (MAIA, 2018).

Segundo Caldas & Moisés (2016) existem três tipos de subsistemas para a geração de energia solar fotovoltaica, são eles: geração centralizada, sistema solar fotovoltaico distribuído on-grid e sistema solar fotovoltaico distribuído off-grid.

A geração centralizada, formada por grandes usinas que, geralmente, ficam afastadas dos centros de consumo, necessitando assim de extensas linhas de transmissão (CALDAS & MOISÉS, 2016).

O sistema solar fotovoltaico distribuído on-grid, representado na Figura 6 é formado geralmente por pequenas usinas instaladas nos pontos de consumo ou próximos deles. Neste sistema, o proprietário pode produzir sua própria energia e, em alguns países, seus excedentes podem ser revertidos em créditos, podendo ser abatidos nas faturas mensais, como acontece no Brasil (CALDAS & MOISÉS, 2016). Neste sistema, o inversor solar, além de exercer a função de converter a corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), tem a função também de sincronizar o sistema com a rede pública. Neste caso, sempre que houver excedente de energia produzida, ele será enviado automaticamente à rede convencional de distribuição. Dessa forma, o relógio medidor gira no sentido contrário e o excedente é convertido em créditos para o consumidor.



Figura 6. Modelo de sistema de geração distribuída de energia solar fotovoltaica *on-grid*. Fonte: adaptada de Strom Brasil, 2018.

E ainda, o chamado sistema solar fotovoltaico isolado ou *off-grid* conforme a Figura 7, que é aquele em que a energia é produzida e o excedente precisa ser armazenado em baterias. Esse tipo de geração ocorre em locais remotos ou de difícil acesso e esses sistemas são necessários pelo fato de estarem distantes dos sistemas interligados (CALDAS e MOISÉS, 2016).

Por outro lado, o sistema *on-grid* é conectado à rede elétrica da concessionária. Neste sistema, o inversor solar, além de exercer a função de converter a corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), tem a função também de sincronizar o sistema com a rede pública. Neste caso, sempre que houver excedente de energia produzida, ele será enviado automaticamente à rede convencional de distribuição. Dessa forma, o relógio medidor *gira no sentido contrário* e o excedente é convertido em créditos para o consumidor. (PIERRO, B, 2017).



Figura 7. Modelo de sistema de geração distribuída de energia solar fotovoltaica *off-grid*. Fonte: adaptada de Strom Brasil, 2018.

Os sistemas *off-grid* são sistemas isolados e autônomos de geração de energia

solar (BORTOLOTO et al., 2017) que usam baterias como dispositivos de armazenamento de energia. Um kit típico desse sistema é composto por módulos solares, cabos, inversores e controladores de carga (bloco de geração de energia), baterias (bloco de armazenamento) e estrutura de suporte (TERRA e SOL, 2018).

Neste sistema, o controlador de carga evita o excesso de carga nas baterias, o banco de baterias armazena a energia excedente e o inversor converte a corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Além disso, segundo Bortoloto et al., (2017), no sistema *off-grid* não há ligação direta com a rede concessionária ou cooperativas energéticas. Dessa forma, ao faltar energia externa, o abastecimento passa a ser feito pelas reservas que ficam armazenadas no banco de baterias, sendo necessário o correto dimensionamento da capacidade de armazenamento para suprir a necessidade do local.

3.1.1.1 Componentes do sistema de energia solar *off-grid* e *on-grid*

São componentes comuns aos dois sistemas, *off-grid* e *on-grid*:

I. Painel solar

Os painéis solares fotovoltaicos são os responsáveis por transformar a energia radiante do Sol em energia elétrica. Esses painéis são constituídos por células fotovoltaicas (células fotoeletroquímicas) ou, simplesmente, "células solares" (Figura 8). A energia dos fótons da luz é transferida para os elétrons que, então, ganham a capacidade de movimentar-se. O movimento dos elétrons, por sua vez, gera a corrente elétrica. Os painéis solares fotovoltaicos (PV) são conectados uns aos outros e, então, conectados ao inversor solar. Os painéis PV são construídos para fornecer potência elétrica por meio de corrente contínua (CC). Os módulos podem ser conectados em série ou em paralelo. (PIERRO, B, 2017)



Figura 8 . Esquema de um módulo fotovoltaico (genérico). Fonte: adaptada de Strom Brasil, 2018.

II. Inversor de frequência

O inversor frequência representado na Figura 9 tem a função transformar a energia de corrente contínua (CC) para corrente alternada (AC), demandada pela maioria dos equipamentos elétricos. O inversor deve dissipar o mínimo de potência, de modo a evitar perdas e produzir uma tensão com baixo teor de harmônicos. Inversores isolados comumente operam com tensões de entrada de 12, 24, 48 ou 120 V (CC) que geralmente são convertidos em 120 ou 240 V (CA), na frequência de 60 ou 50 Hertz. (Fronius, Belo Horizonte, MG, Brasil).



Figura 9 . Inversor de frequência *on-grid*. Fonte: Portal Solar.

III. Fiação elétrica

Os cabos para sistemas fotovoltaicos devem ser dimensionados para uma queda de tensão máxima de 2% entre os módulos e o controlador. Para circuitos controlador-bateria e bateria- inversor, a queda de tensão não deve exceder 1% e o condutor deve ter capacidade para suportar pelo menos 125% da corrente nominal de curto-circuito dos módulos fotovoltaicos. (NBR 5410)

IV. Tomadas e interruptores

As tomadas e interruptores de corrente alternada devem estar em conformidade com o padrão nacional de instalações prediais - NR10.

Os componentes a seguir são utilizados apenas em sistemas *off-grid*:

V. Acumulador de energia (bateria):

As baterias são acumuladores de energia elétrica destinados a fornecer energia em caso de picos de consumo ou em caso de falha no sistema de retificação e/ou na falta de energia primária. A bateria é um componente fundamental nos sistemas isolados de energia solar fotovoltaica, sendo responsável por garantir o fornecimento constante de energia, mesmo nos períodos de baixa geração. A Figura 10 ilustra uma bateria do tipo estacionária.



Figura 10. Bateria de chumbo-ácido, tipo estacionária. Fonte: Acumuladores Heliar (2019).

Após a conversão de energia luminosa em energia elétrica, pelos painéis, as baterias são utilizadas para armazenar esta energia, para utilização, principalmente, durante a noite. São classificadas em baterias primárias e secundárias. Nas primárias, quando todo o reagente é consumido e a reação de oxirredução que ocorre dentro delas cessa, não podem ser carregadas novamente e são descartadas. As secundárias podem

ser recarregadas, uma vez que, ao se aplicar corrente em seus terminais, elas podem reverter as reações que geram a energia elétrica (BRAGA, 2008).

VI. Controlador de carga

O controlador de carga (Figura 11), é um dos principais componentes de um sistema fotovoltaico. Tem a função de proteger as baterias contra descargas profundas e excesso de carga. Dessa forma, aumenta a vida útil dos acumuladores e garante que a maior parte da energia produzida pelos painéis solares seja armazenada nas baterias, com eficiência. Os reguladores de carga devem ser selecionados de acordo com as características do projeto do sistema. (NEOSOLAR, 2010)

Existem dois tipos de controladores de carga: PWM e MTTP. P mais comum é PWM (*Pulse Width Modulation*), que tem menor eficiência, no entanto, são mais procurados pelo seu baixo custo. Já os controladores MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) tem um custo mais elevado, no entanto, são mais eficientes (NEOSOLAR, 2010).



Figura 11 . Controlador de carga. Fonte: Mais Solar (2020).

São componentes utilizados apenas em sistemas *on-grid*:

VII. Quadro de luz

A energia que sai do inversor solar vai para o "quadro de luz" e é distribuída para a casa ou empresa, reduzindo a quantidade de energia que o usuário compra da concessionária. A energia solar pode ser usada para TVs, aparelhos de som, computadores, lâmpadas, motores elétricos, ou seja, todos os equipamentos que usam energia elétrica alternada, da concessionária.

VIII. Medidor de energia bidirecional

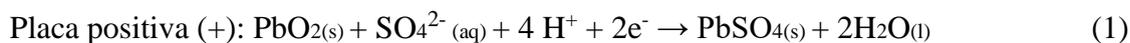
O excesso de eletricidade gerado pelos painéis solares, ou seja, o que o usuário não consome, é devolvido para a rede elétrica por meio do inversor, passando pelo medidor de energia bidirecional. Esse tipo de equipamento mede a entrada de energia da concessionária que é consumida quando não há radiação solar suficiente. Por outro lado, a energia gerada em excesso, quando houver muita energia solar ou pouco consumo interno, é inserida na rede da distribuidora e também é medida. Esta energia elétrica é convertida a partir da energia solar e que vai para a rede da concessionária vira "créditos de energia" para serem utilizados posteriormente. O medidor bidirecional é fornecido pela concessionária.

3.1.2 Acumuladores chumbo-ácido

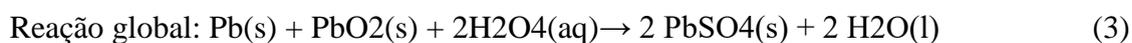
As baterias chumbo-ácido são baterias chamadas secundárias, isto é, seus reagentes químicos podem ser reconvertidos até quantidades muito próximas às iniciais, por intermédio da passagem de uma corrente elétrica que flui no seu interior. Estas baterias podem ser recarregadas, possuindo, assim, ciclos de vida mais longos. Nestas baterias, a reação que fornece energia é em geral exotérmica, mas em certos casos também é possível à ocorrência de reações endotérmicas quando alguma fonte externa de energia força a reação de volta no sentido dos reagentes (COELHO, 2017). O processo de geração de corrente elétrica de uma bateria resulta da aplicação de diferença de potencial, resultando em perturbações nos níveis de energia que provoca saltos de elétrons de um estado para o outro; nestes saltos de elétrons, de um nível mais alto para um mais baixo, a energia liberada das reações é convertida em eletricidade. Numa bateria, todos estes processos ocorrem no interior das células eletroquímicas, que são constituídas de um conjunto de célula/eletrodo/eletrólito que sofrem a oxirredução.

Nas células galvânicas de chumbo-ácido, a energia química produzida pelas reações redox é convertida em energia elétrica. Os locais de condutividade elétrica onde a oxidação ou a redução ocorrem são chamados de eletrodos: a oxidação ocorre no ânodo e a redução ocorre no cátodo (COELHO, 2017).

No acumulador de chumbo-ácido, a reação de redução produz sulfato de chumbo a partir de dióxido de chumbo conforme Equação 1; por sua vez, a reação de oxidação envolve a conversão do chumbo em sulfato de chumbo, conforme Equação 2.



A reação global, de descarga da célula, é a reação de duplo sulfato apresentada na Equação 3. Os agentes oxidantes e redutores são ambos sólidos, assim, não existe a necessidade de uma ponte salina para separar os agentes. Sem uma ponte salina, a resistência interna da célula é muito baixa, produzindo assim altas correntes necessárias para serem usadas como fonte de energia.



Uma formação típica de uma bateria (ex: 12 VDC) chumbo-ácido possui seis células ligadas em série, cada uma das quais fornece cerca de 2 VDC (Figura 12). Cada célula contém duas grades de chumbo compactada com o material do eletrodo; o ânodo é esponjoso e composto por amálgama de chumbo (Pb) em pó; e o cátodo é composto por amálgama de pó de PbO₂ (dióxido de chumbo). As grades estão imersas em uma solução eletrolítica de água e ácido sulfúrico; folhas de fibra de vidro entre as grades evitam curto-circuito por contato físico espontâneo (BASTOS, 2013).

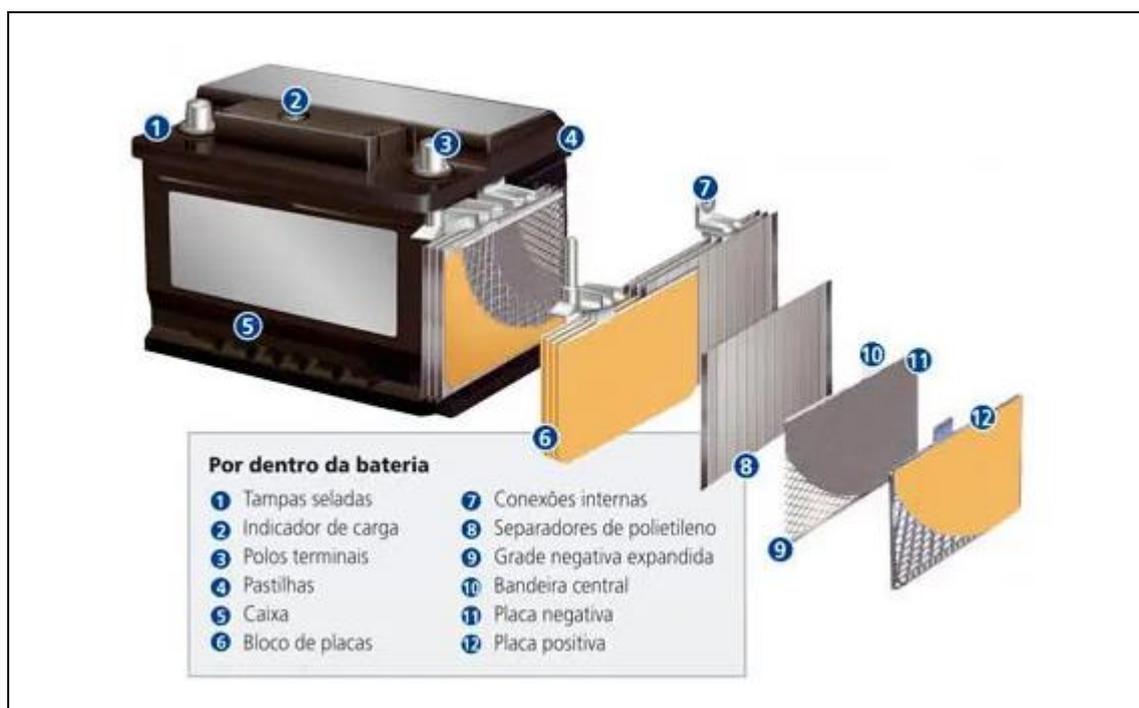


Figura 12 . Desenho esquemático de uma bateria chumbo/ácido. Fonte: UTFPR, 2021.

Quando a bateria se descarrega, as placas de chumbo tornam-se quimicamente iguais, o ácido fica mais fraco e a tensão baixa. Eventualmente, a bateria descarrega-se

de tal modo que deixa de poder fornecer eletricidade em um valor de tensão útil. Uma bateria descarregada pode ser recarregada injetando-se corrente elétrica. O seu carregamento completo restaura a diferença química entre as placas e deixa-a pronta para fornecer a potência plena. Este processo de carga e descarga da bateria de chumbo-ácido, onde a energia pode ser descarregada e restaurada, é denominado de capacidade cíclica da bateria. No entanto, apesar dessa capacidade, as baterias têm uma vida útil de cerca de 2 a 5 anos, devido à reação química que acontece constantemente, pois à medida que o ácido sulfúrico é consumido, água vai sendo formada e, durante a carga da bateria, o sulfato de chumbo é reconvertido a chumbo no ânodo e a dióxido de chumbo no cátodo (BASTOS, 2013).

Os principais parâmetros de trabalho de baterias de chumbo-ácido variam de acordo com os fatores ciclos de recarga, profundidade de descarga e temperatura (NATARAJ, et al 2015). O processo de carga e descarga pode ser repetido por algumas centenas de vezes e o número de ciclos de carga e descarga é inversamente proporcional à profundidade da descarga, ou seja, o quanto a bateria é descarregada antes de ser carregada novamente (Figura 13). A situação que mais danifica uma bateria de chumbo-ácido é quando a mesma opera sob temperaturas elevadas (Figura 14), o que reduz sua vida útil (MOURA,2011).

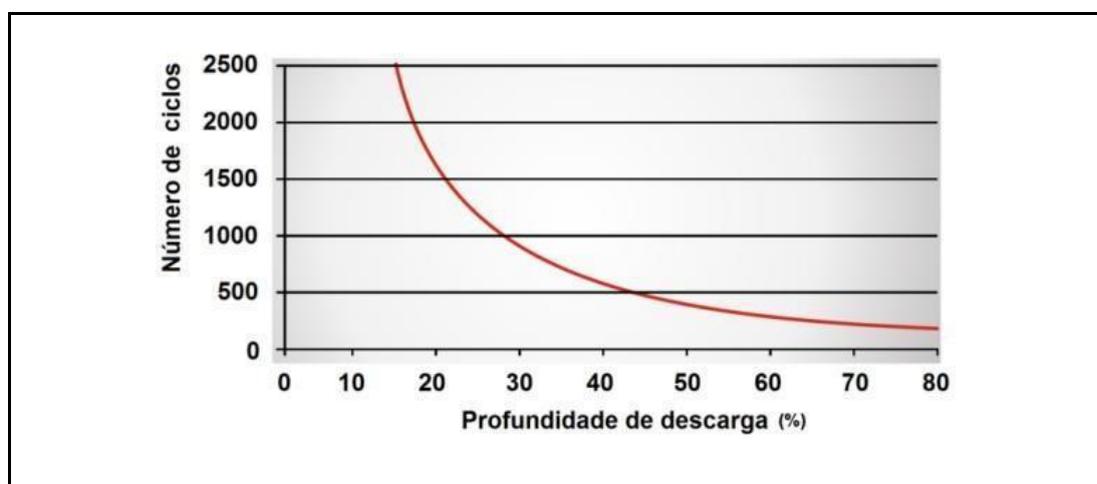


Figura 13 . Desgaste de uma bateria chumbo-ácido em função da profundidade. Fonte: MOURA, 2011.

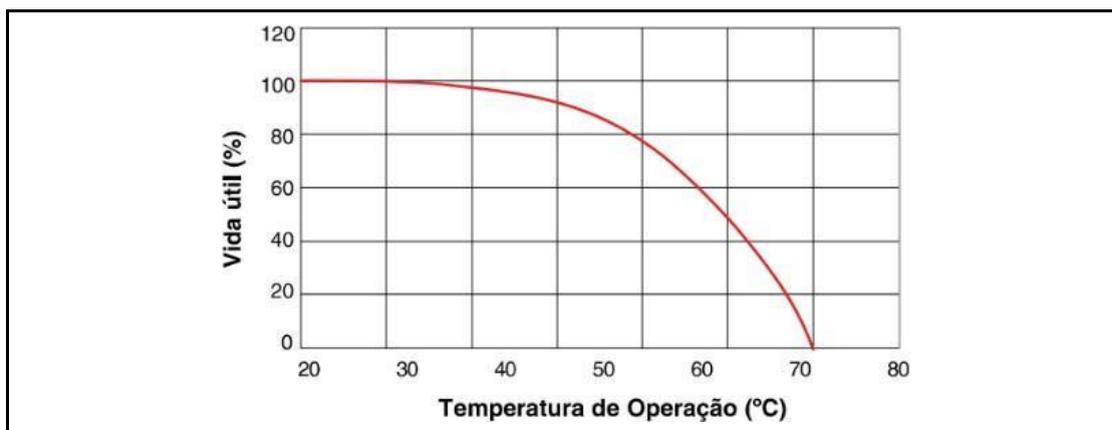


Figura 14 . Desgaste de uma bateria chumbo-ácido em função da temperatura. Fonte: Tudor (2017).

3.1.3 Acumuladores íon-lítio

O lítio é um metal leve, com elevado potencial eletroquímico e um dos metais com maior densidade eletroquímica e densidade energética, características muito atrativas para utilização em sistemas de armazenamento de energia, que necessitam de elevadas densidades de potência e energia (MEADOWS, 2012).

Em 1980, foi desenvolvida a primeira bateria de lítio recarregável, quando foi utilizado o lítio como ânodo, no entanto, houve problemas relacionados à segurança, pois a alta reatividade originou reações violentas que poderiam ocasionar explosões. Uma alternativa foi utilizar sua forma iônica, com um ânodo à base de grafite e o lítio como cátodo (ROSOLEM , 2012). Em 1991, a Sony apresentou comercialmente a primeira bateria recarregável de íon-lítio, com características baseadas no ânodo de grafite (C) e o cátodo de cobaltado de lítio (LiCoO₂) (STEWART, 21012). Por conta dessas características atraentes e da demanda de mercado, esse tipo de tecnologia vem sendo bastante estudada, principalmente para sistemas independentes de energia.

As baterias à base de lítio apresentam maiores níveis de potência e energia por unidade de massa, uma vez que o lítio é um elemento pequeno, leve e apresenta um alto potencial de redução. Sua energia específica é quatro vezes maior em comparação aos níveis da bateria chumbo-ácido (GARCHE, 2010).

Durante a descarga da bateria, a reação que ocorre no ânodo é a oxidação do carbono, liberando, assim, os íons lítio para manter a eletroneutralidade do material; durante este processo, os íons lítio migram desde o interior do material que compõe o ânodo até dentro do material do cátodo e os elétrons movem-se através do circuito externo. Durante a descarga, os íons de lítio se movem do ânodo para o cátodo, passando pelo eletrólito, fazendo com que ocorra a descarga de elétrons do lado do

ânodo e alimentando, assim, a carga; durante a carga, o processo da passagem de íons é invertido e os íons de lítio passam de volta, do cátodo para o ânodo (Figura 15) (STEWART, 21012).

A Equação 4 mostra as reações químicas básicas ocorridas durante a carga e a descarga das baterias de íon-lítio.

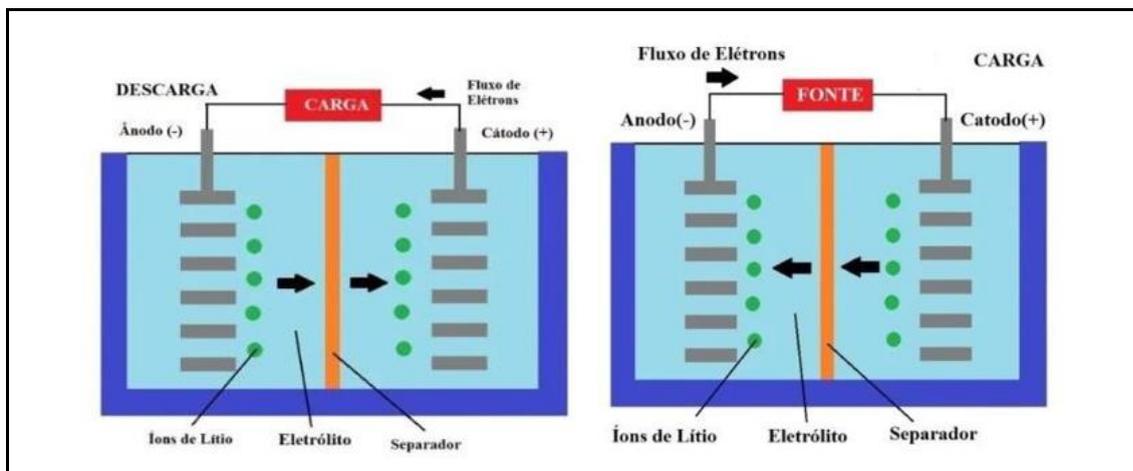


Figura 15 . Esquema dos processos eletroquímicos que ocorrem na bateria íon-lítio, descarga e carga. Fonte: TURNER, 2020.

As principais características das baterias de lítio são a tensão, na ordem de 4VDC, e a densidade energética, entre 100 Wh/kg e 150 Wh/kg. O material mais utilizado no eletrodo negativo é o grafite, sendo o eletrodo positivo composto por materiais à base de óxidos metálicos de lítio, tais como: $LiMO_2$, $LiCoO_2$ e $LiFePO_4$. O eletrólito normalmente é um sal de lítio ($LiPF_6$) diluído em solventes orgânicos e embebido num separador.

As baterias de lítio possuem vantagens, como a tensão elevada, elevada energia específica e elevado número de ciclos de carga e descarga. Comparado com os 2 VDC da bateria chumbo-ácido, a bateria de íon-lítio possui tensão mais elevada, de 3 VDC a 4 VDC; em relação à energia específica, a de lítio tem quatro vezes mais que a de chumbo-ácido; finalmente, as baterias de íon-lítio apresentam excelente desempenho em relação ao número de ciclos de carga e descarga.

Os sistemas de armazenamento de energia da bateria são um subconjunto do sistema de armazenamento de energia para equipamentos, seja utilizando meios térmicos quanto eletromecânicos ou eletroquímicos. Sistemas de armazenamento são utilizados para fontes de energia intermitentes, como solar, eólica ou das marés, para que eles possam equilibrar a produção e o uso de energia, reduzindo, assim, a

demanda de energia elétrica no pico.

Baterias de íon-lítio são preferidas nesses sistemas, porque oferecem alta densidade de energia e podem ser carregadas e descarregadas frequentemente, durante suas vidas. Seu custo de produção está diminuindo. A capacidade de carga rápida permite o acúmulo rápido de energia dentro de um curto período, permitindo a maximização da energia solar, das marés ou do vento (TURNER, 2020).

3.1.4 Temperatura de Operação

A temperatura, seja interna ou externa, afeta o funcionamento da bateria, sua eficiência e capacidade. Altas temperaturas podem causar problemas como envelhecimento prematuro, explosões, e podem facilmente danificar o equipamento. Se a bateria fica constantemente quente quando conectada a um circuito, pode ser um indicador que o circuito está sobrecarregado ou a bateria está com defeito (TURNER, 2020).

Segundo GROIB, René, 2021, as baterias são influenciadas diretamente pela temperatura na qual operam, tanto altas quanto baixas, sendo que, normalmente, são projetadas para operar de maneira satisfatória em uma temperatura ambiente entre 20 °C e 25 °C. A depender da sua composição química, essa faixa pode sofrer alterações. Pontos ótimos de temperatura têm sido determinados para certos tipos de baterias. (PESARAN; SANTHANAGOPALAN & KIM, 2013).

Considerando as baterias secundárias, que podem ser reutilizadas ciclicamente por meio da descarga/recarga, os efeitos causados por temperaturas abaixo ou acima das de operação influenciam, principalmente, na sua potência, na energia disponível (ou capacidade) e na sua vida útil (GROIB, René, 2021).

De acordo com a Blue Box Batteries (2015), seguindo a equação de Arrhenius, um aumento de 10 °C na temperatura das baterias secundárias de chumbo-ácido podem diminuir pela metade a sua vida útil. Somado a isso, segundo GROIB, René, 2021, além da vida útil, outros fatores, como a capacidade, também são diretamente afetados por esse aquecimento.

Vale ressaltar que, para o tipo de bateria supramencionado, a equação de Arrhenius só é inteiramente verdadeira para aquelas que operem idealmente entre 15 °C e 40 °C. (BLUE BOX BATTERIES, 2015).

A Figura 16 apresenta um gráfico que demonstra, de acordo com a equação de Arrhenius, a relação entre a temperatura de operação e a porcentagem de vida útil de uma bateria de chumbo-ácido, cuja temperatura ideal é de 20 °C:

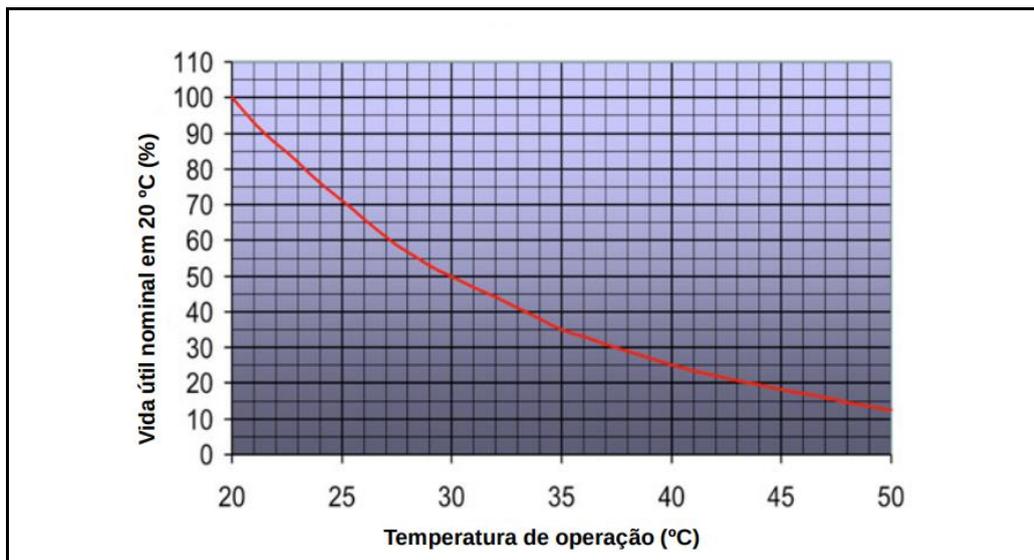


Figura 16. Porcentagem de vida útil vs. temperatura de operação de uma bateria de chumbo-ácido. Fonte: BLUE BOX BATTERIES, 2015.

Em se tratando das baterias secundárias de íon-lítio, Ma et al. (2018) afirmam que, a temperaturas abaixo de 0 °C, o desempenho dos componentes diminui drasticamente, como também aponta o estudo realizado por Nagasubramanian (2001), cujos resultados demonstraram que a potência e a capacidade destas baterias tiveram seus valores reduzidos quando submetidas a -40 °C.

A Figura 17 apresenta um gráfico que ilustra a comparação entre as capacidades de baterias de íon-lítio com eletrólitos convencionais e otimizados, a diferentes temperaturas:

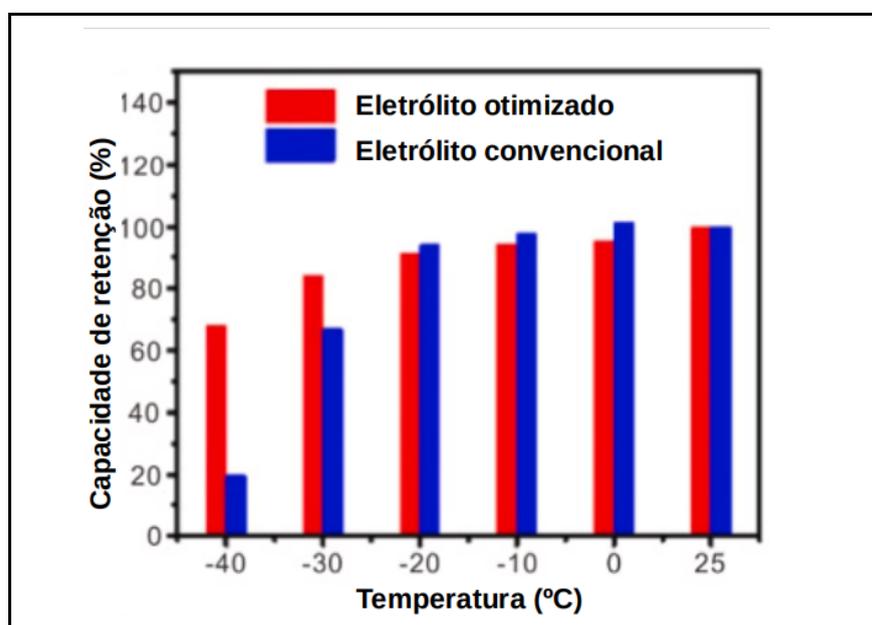


Figura 17. Comparação da capacidade de retenção, em diferentes temperaturas, entre eletrólitos otimizados e convencionais. Fonte: LI et al., 2017.

Este gráfico mostra que alguns dos fatores influenciados pelas baixas temperaturas, nas baterias de íon-lítio, podem ser minimizados com a utilização de componentes que contenham eletrólitos otimizados. (LI et al., 2017).

Ma et al. (2017) afirmam que os efeitos das altas temperaturas nas baterias de íon-lítio são mais complexos do que aqueles devidos a temperaturas mais baixas, devido ao fato de que é gerado calor no interior desses componentes durante a sua operação, o que torna o conhecimento desses fenômenos determinante para a minimização desses efeitos das altas temperaturas. De um modo geral, a capacidade máxima dessas baterias pode sofrer consideráveis diminuição quando submetidas a temperaturas superiores às projetadas, em especial com o aumento do número de ciclos de uso.

O comportamento supracitado está ilustrado na Figura 18.

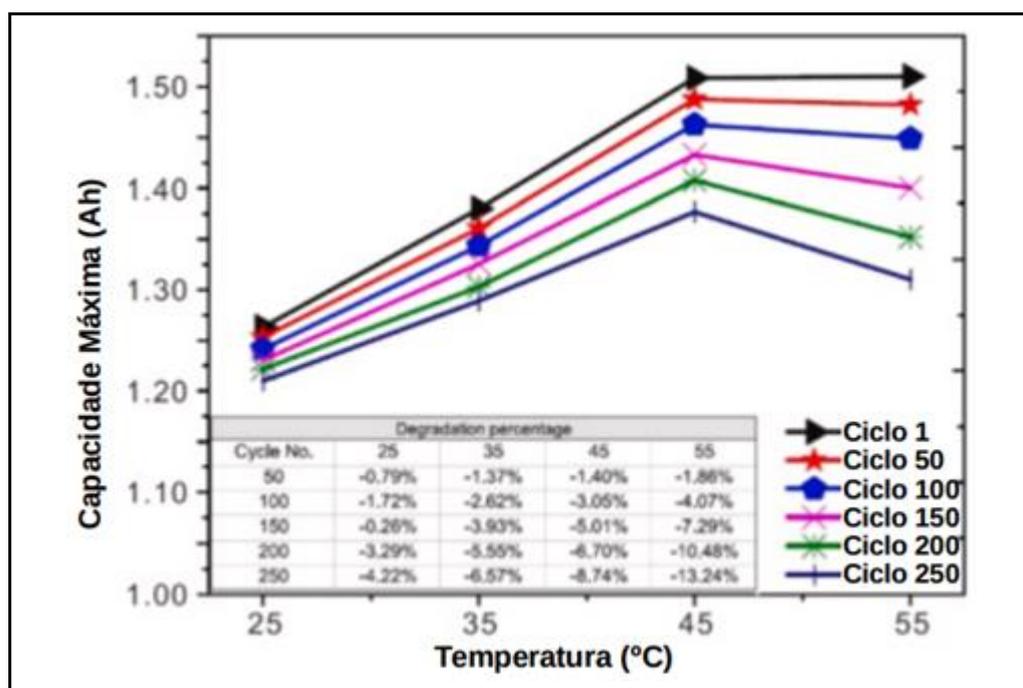


Figura 18. Mudança na capacidade máxima e percentual de degradação de bateria de íon-lítio testada. Fonte: LENG; TAN & PECHT, 2015.

3.1.5 Regime de Carga e Descarga

Baterias recarregáveis possuem um parâmetro definido como a fração entre a energia total (ou capacidade) utilizada sobre o total disponível na bateria. Tal parâmetro é chamado de Estado de Carga (do inglês *State of Charge* - *SOC*). Essa razão, quando em 100%, quer dizer que a bateria está completamente carregada; analogamente, quando em 0%, ela está totalmente descarregada, indicando, quantitativamente, a carga disponível.

Para as baterias de chumbo-ácido, segundo Wong, et al (2008), um regime de carga com a compensação apropriada de temperatura é crucial para o prolongamento da vida útil desses componentes. Ainda de acordo com os mesmos autores, tal regime deve manter a bateria próximo aos 100% do *SoC*, de modo a prevenir a sulfatação.

No que diz respeito às baterias de íon-lítio, Zhang et al. (2017) apontam que muitos estudos têm sido empreendidos na determinação do regime de carga otimizado para tais componentes, de modo a preservar características como vida útil e capacidade ao longo do tempo de uso, principalmente aprimorando seu comportamento térmico.

Um regime de carga consiste em quatro modos fundamentais: o modo *bulk*; o modo de absorção; o modo de equalização; e o modo *standby*. Eles podem ser vistos na Figura 19:

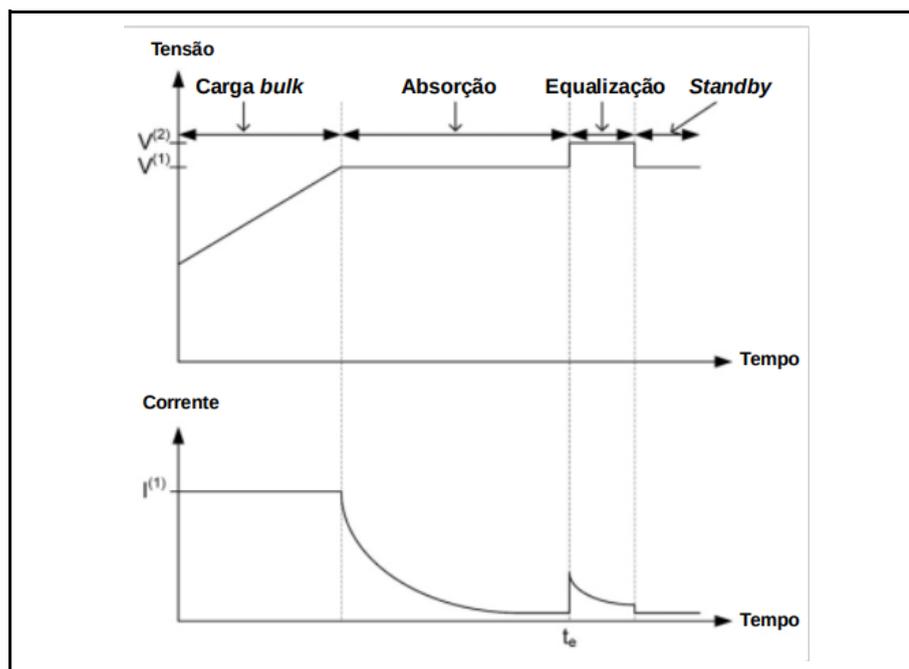


Figura 19. Modos de operação ideais em um regime de carga. (WONG, et al 2008).

Ao considerar o ilustrado na Figura 19, o modo *bulk* é caracterizado quando um alto valor de corrente é fornecido pelo carregador, sendo que a bateria permanece nesse modo até que a tensão de carga atinja o valor de regulação, apresentado no gráfico superior como $V(1)$. Já no modo de absorção, o componente continua sendo carregado, a uma tensão constante (mesma $V(1)$), entretanto, a corrente diminui exponencialmente de modo a minimizar a corrosão e a evolução do hidrogênio. No modo de equalização, a bateria é sobrecarregada com uma tensão de regulação maior, o valor de $V(2)$, por um período de tempo mais curto. Por fim, no modo de *standby* o componente é mantido em um *SoC* elevado por uma sobrecarga contínua. (WONG;

Het al, 2008).

De maneira complementar, a Profundidade de Descarga (do inglês *Depth of Discharge*, ou *DoD*) determina a razão de potência que pode ser drenada da bateria. Nesse caso, o *DoD* é o inverso do *SoC* e pode ser representado em ampère-hora ou em porcentagem. Tal característica está diretamente associada à vida útil da bateria, como demonstrado pela Rolls Battery Engineering (2014).

A descarga de uma bateria é um teste específico realizado, comumente, por meio do uso de um equipamento microcontrolado de corrente contínua, chamado de banco de carga, tendo a finalidade principal de realizar a medição da capacidade do componente, além de ser possível monitorar a tensão elétrica durante o procedimento. Os principais dados colhidos com esse ensaio são: tempo de descarga; corrente; e tensão mínima (V_{min}).

Existem diversos métodos para determinar um regime de descarga adequado ou otimizado para as baterias recarregáveis. Djordjevic e Karanovic (2015) propõem um modelo matemático tridimensional para o método da curva de descarga calculada (do inglês *Calculated Discharge Curve Model — CDCM*), baseada no volume de energia total, como a soma da energia na carga e das perdas de energia. Tal método pode ser usado tanto em componentes mono-células quanto nos multi-células e em sistemas físico-químicos, termodinâmicos e eletroquímicos cuja energia entregue seja a soma do trabalho útil e das perdas de energia, assim como em modos de descarga contínuo ou intermitente.

3.1.6 Número de Ciclos

Como já mencionado, o *DoD* indica o quantitativo do que já foi descarregado da bateria relativo à sua capacidade total. Segundo Garcia (2020), quanto maior a profundidade de descarga, menor é o número de ciclos desses componentes. O autor complementa que a vida útil das baterias pode ser definida como o número de ciclos, a 100% do *DoD*, que uma célula pode operar até que sua capacidade baixe a 80% da inicial e comece a ter perdas significativas no seu desempenho.

Em se tratando das baterias de chumbo-ácido, dependendo da aplicação para a qual foram projetadas, podem durar cerca de 550 ciclos completos de carga-descarga. Quando aplicadas a carros elétricos, como carros de golfe, por exemplo, tal número equivaleria a cerca de 2 anos de utilização. Entretanto, devido à relação com a profundidade de descarga, se um desses componentes for descarregado a 50% do seu *DoD*, diariamente, ela durará cerca de duas vezes mais se fosse submetida a ciclos de

80%. (NORTHERN et al,2021).

Tal relação está ilustrada no gráfico da Figura 20:

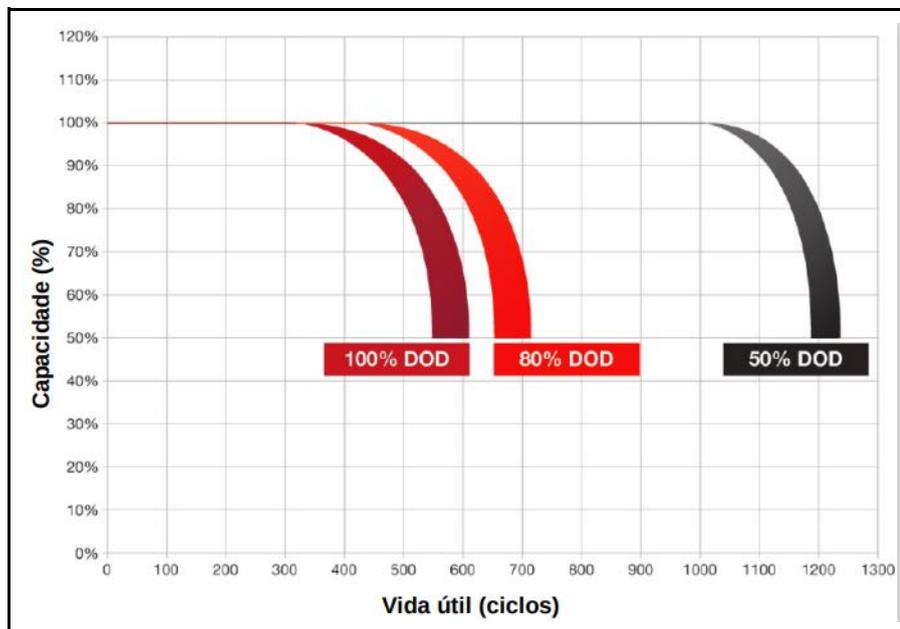


Figura 20. Influência de diferentes DoDs na vida útil das baterias de chumbo-ácido. Fonte: ROLLS BATTERY ENGINEERING, 2021.

Já as baterias de íon-lítio possuem, comumente, uma vida útil de 500 a 1000 ciclos, No entanto, a depender da aplicação e da quantidade de energia necessária, é possível expandir esses números, modificando a porcentagem da profundidade de descarga. Existe uma relação logarítmica entre o *DoD* e a vida útil do componente, sendo que o número de ciclos aumenta exponencialmente quando a profundidade de descarga diminui. Dessa forma, uma bateria de íon-lítio terá cerca de 500 ciclos a 100% do *DoD*, e 2050 ciclos a 30% do *DoD*. (GARCIA, 2020).

De acordo com a (Northern et al, 2021) o valor mais apropriado para uso diário desses componentes é de 50% do DoD, não significando não ser possível ultrapassar tal quantidade esporadicamente, mas que ao projetar um sistema cujas cargas sejam conhecidas, a média de 50% da Profundidade de Carga mostrará ser o fator de melhor relação entre armazenamento e custo.

3.1.7 Capacidade Energética das Baterias

A capacidade energética de uma bateria é uma medida, comumente expressa em ampère-hora (Ah) ou miliampère-hora (mAh), da carga armazenada na bateria, determinada pela massa de material ativo no componente. Sendo assim, essa métrica representa o valor máximo de energia que pode ser drenado da bateria sob as condições de projeto. Entretanto, é sabido que essa capacidade pode variar do valor

nominal ao real, devido à forma como o componente é descarregado. (FARAHANI, 2008).

Farahani (2008) afirma que o processo de se descarregar uma bateria de acordo com as especificações do fabricante pode auxiliar, normalmente, na entrega da capacidade nominal projetada; por outro lado, ao seguir outros perfis de descarga, a relação de capacidade passa a não ser diretamente linear. É válido lembrar que esse parâmetro do componente depende da idade da bateria, de seu regime de carga e descarga e da temperatura.

A depender da velocidade com que a bateria seja descarregada, neste caso em se tratando de rápidas descargas, onde a drenagem de corrente é alta, a quantidade de energia a ser extraída é reduzida. O contrário também é verdadeiro: quanto mais lentamente o componente for descarregado, mais energia pode ser extraída da bateria, sendo sua capacidade, assim, maior.

Segundo Farahani (2008), a maneira mais simples de, aproximadamente, determinar a vida de uma bateria é dividir a sua capacidade atual pela total usada pelo componente durante a auto-descarga. Com o tempo, uma bateria perde sua capacidade, mesmo quando não está em uso, devido a vazamentos internos. Essa medida, a de auto-descarga, é comumente medida pelos fabricantes em auto-descarga por mês.

A Figura 21. contém um gráfico que relaciona o ciclo de trabalho de uma bateria típica ao uso de sua capacidade em um mês:

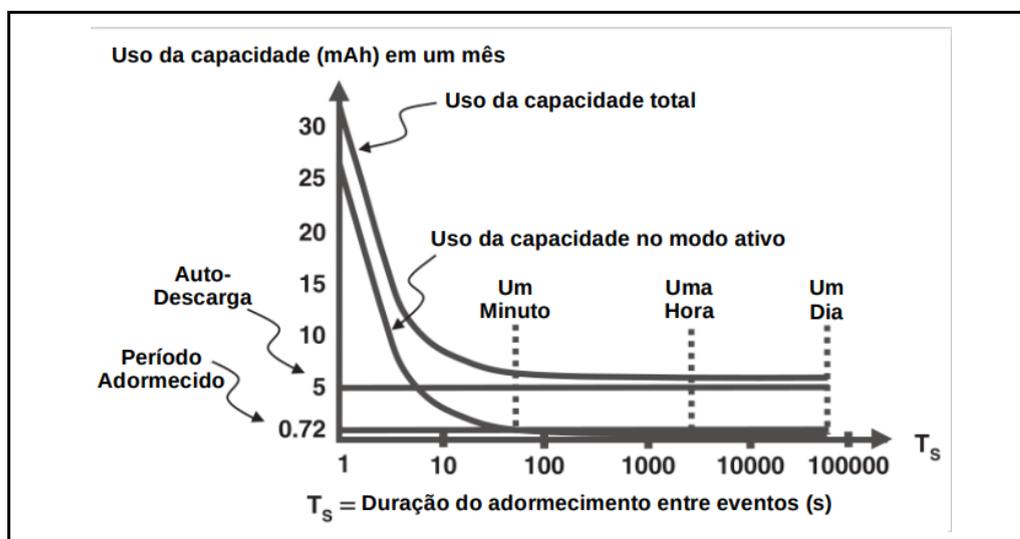


Figura 21. Capacidade total usada em diferentes atividades para um período de um mês. Fonte: FARAHANI, 2008.

Existem cálculos para a determinação da capacidade ideal de uma bateria mas,

de maneira simplificada, como a função principal desses componentes é armazenar energia, uma maneira de determinar a capacidade energética de uma bateria é multiplicar a sua capacidade em Ah por sua tensão nominal.

3.1.8 Tensão e Corrente

Como uma das características fundamentais de uma bateria, a tensão elétrica é determinada pelo conjunto de reações químicas ocorridas em seu interior, a concentração de seus componentes e sua polarização. Numa bateria de chumbo-ácido, a tensão nominal de cada célula é de 2 V, sendo esta calculada em condições típicas de equilíbrio. É válido notar que a tensão de circuito aberto, ao ser medida diretamente nos terminais do componente, é uma aproximação da nominal. (ENERTEC, 2008).

De acordo com Perez (1993), toda célula eletroquímica das baterias possui uma resistência interna. Ainda segundo o autor, a tensão elétrica da bateria muda devido a essa resistência interna, sendo que, quando o componente é recarregado, a tensão aumenta. Quanto maior a corrente de carga, maior o ganho de tensão. O inverso também é verdadeiro: as correntes de descarga causam um decaimento na tensão das células, de modo que quanto maior a corrente de descarga, maior o decaimento da tensão do componente e isso se aplica para todos os tipos de bateria eletroquímica.

Esse comportamento, acima descrito, pode ser observado na Figura 22:

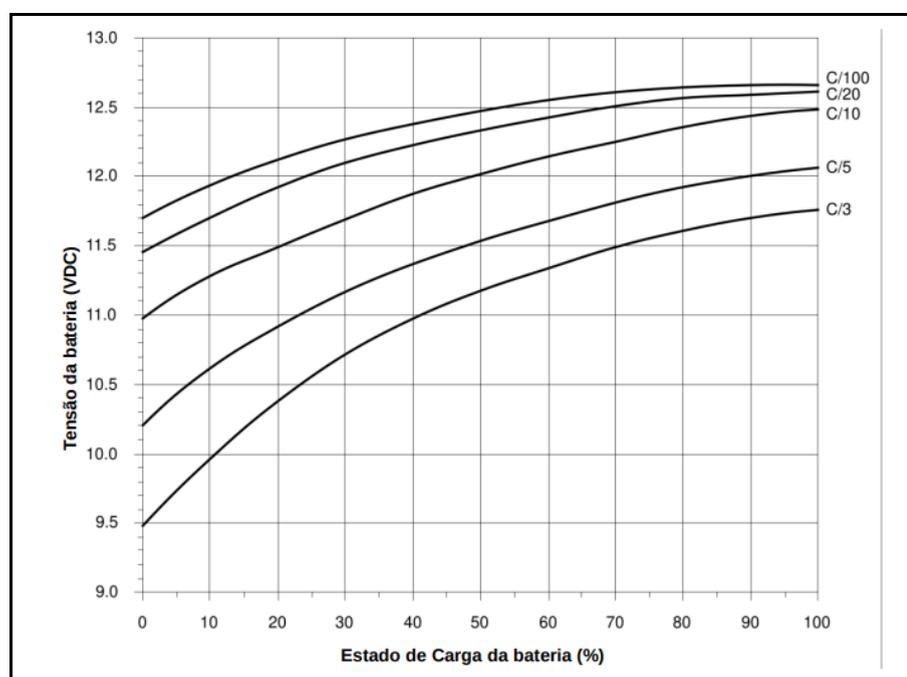


Figura 22. Comportamento da tensão elétrica de uma bateria de chumbo-ácido de 12V na descarga. (PEREZ, 1993).

De acordo com a figura 22, o gráfico representa a razão da corrente durante o

ciclo de descarga ou carga (PEREZ, 1993). Em valores de C/X , quanto menor o valor de X , maior a corrente de descarga, respeitando os valores de corrente em relação a tensão. Como exemplo podemos trazer do próprio gráfico: em $C/3$ a bateria atinge seu estado de carga 0% em 9,5 V e em $C/100$ a bateria atinge seu estado de carga 0% em 11,7 V.

De maneira análoga, como supracitado, um comportamento semelhante pode ser observado nas baterias de íon-lítio, como ilustrado no gráfico da Figura 23:

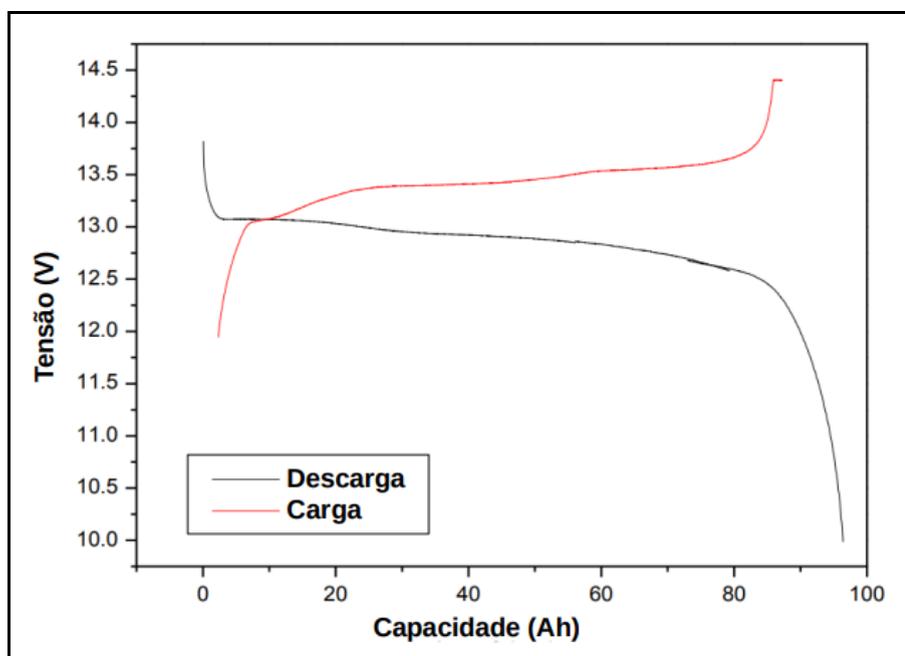


Figura. 23. Comportamento da tensão elétrica de uma bateria de íon-lítio de 12,8 V nos ciclos de carga-descarga. Fonte: ELECTRIC CAR PARTS COMPANY.

Perez (1993) relata que se a tensão elétrica das baterias são relacionadas ao seu SoC , então sua variação deve ser compensada, considerando o movimento da corrente, fator que deve ser mantido em mente no projeto de carregadores e sistemas retroalimentados. Além disso, segundo a Enertec (2008), a manutenção da tensão especificada pela fabricante durante o ciclo de carga é um dos fatores essenciais para uma vida útil prolongada. No caso das baterias de chumbo-ácido, valores altos acarretarão em uma geração acelerada de corrosão da placa e, se forem valores baixos, poderá causar sulfatação — o que gera danos à capacidade e redução da vida útil.

3.1.9 Segurança no uso de acumuladores

Requisitos de segurança devem ser levados em consideração quando se fala em manutenção de baterias. Esta deve ser executada por pessoal qualificado e com equipamentos de proteção adequados. Deve ser considerada a legislação vigente, inclusive a NBR 5410, e as instruções do manual do fabricante.

Seguem algumas orientações para a manutenção das baterias (TUDOR, 2017):

- 1) Atentar quanto ao risco de choque elétrico;
- 2) Não usar pulseiras, anéis, relógios ou correntes metálicas e outros adornos metálicos;
- 3) Não fumar, não utilizar qualquer aparelho ou instrumento e não realizar nenhum procedimento que produza chama ou faísca no ambiente da bateria;
- 4) Certificar-se que os cabos utilizados nos ensaios de descarga tenham capacidade de condução de corrente e isolamento elétrico compatíveis com tensão e corrente envolvidas no ensaio, e tenham comprimentos adequados para evitar a ocorrência de centelhamento nas proximidades da bateria durante o chaveamento das cargas resistivas;
- 5) Todos os equipamentos e ferramentas que possuam partes metálicas expostas devem ser eletricamente isolados;
- 6) Não permitir na sala da bateria a presença de materiais ou equipamentos não vinculados a manutenção da bateria, sobretudo materiais inflamáveis; mesmo o material permitido não pode obstruir a rota de fuga da sala;
- 7) Não colocar objetos e ferramentas sobre os elementos ou monoblocos;
- 8) Descarregar a energia estática do próprio corpo antes de entrar na sala da bateria, tocando um ponto de aterramento.

A NBR 5410 é uma norma que determina condições e regras para instalações elétricas de baixa tensão de até 1000 V em corrente alternada e 1500 V em corrente contínua, com frequência de até 400 Hz, no Brasil. Esta norma se aplica para instalações elétricas de casas, prédios, setor comercial, industrial, agropecuário, etc (TUDOR, 2017).

3.1. 10 Política de incentivos fiscais no Brasil (legislação)

A adoção de fontes renováveis, aliada a uma mudança no modelo de geração de eletricidade, pode propiciar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos, resultando em uma política de inclusão social e

consolidação da cidadania.

O acionamento de termelétricas, para suprir a falta de eletricidade, encarece a energia elétrica fornecida aos consumidores e contribui para o agravamento das emissões dos gases de efeito estufa. Daí a importância na diversificação da matriz elétrica e no desenvolvimento de outras fontes renováveis.

A experiência nacional evidencia que o Brasil vem fomentando, ao longo dos anos, o uso da energia solar fotovoltaica, por meio de programas de incentivo. Garantir o desenvolvimento de um mercado, pois a energia solar fotovoltaica vem sendo contemplada por políticas públicas específicas de longo prazo e pela legislação em vigor, programas de incentivo a outras fontes renováveis de energia como PROINFA(JANUZZI, 2009), e agora em 2022 a Lei 14.300 possui um vasto potencial para a aplicação dessas fontes. A seguir serão apresentados alguns dos incentivos criados pelo governo, a fim de intensificar a utilização da geração fotovoltaica na matriz energética do Brasil.

PRODEEM e “Luz para Todos”

A primeira iniciativa que efetivamente incorporou o uso da energia solar fotovoltaica em âmbito nacional foi o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios – PRODEEM. Instituído em 1994, promoveu a aquisição de mais de 8.500 sistemas fotovoltaicos, o equivalente a 5 MWp, possibilitando a eletrificação de localidades isoladas. Porém, a metodologia adotada na época não permitiu uma inserção tecnológica sustentável, de modo que não se logrou êxito no amadurecimento dessa alternativa de geração. Em 2003, foi instituído, também pelo Governo Federal, o Programa Luz para Todos (LpT), que visa prover o acesso à energia elétrica a todos os domicílios e estabelecimentos do meio rural. O processo de universalização tem ocorrido majoritariamente por meio de extensão da rede, mas também contempla a instalação de sistemas fotovoltaicos.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou, em 2011, a Chamada de Projeto Estratégico de P&D, denominada “Arranjos técnicos e comerciais para inserção da geração solar fotovoltaica na matriz energética brasileira”. O objetivo foi o de proporcionar a viabilidade técnica e econômica da geração solar fotovoltaica em território nacional, estimulando a redução dos custos e incentivando o desenvolvimento de toda a cadeia produtiva no país, além de contribuir para aumentar a segurança do abastecimento eletro-energético e para a diversificação da matriz energética.

Com o avanço do Brasil na introdução da tecnologia solar fotovoltaica, os

incentivos fiscais vêm crescendo para equipamentos fotovoltaicos. Os dois impostos mais relevantes ao custo do produto e que suas reduções incentivam o uso de alguns equipamentos fotovoltaicos são o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços (ICMS), de competência estadual, e o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), de competência federal. Neste ano de 2022 a Lei 14.300 instituiu o marco legal de microgeração e minigeração distribuída o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS).

De acordo com a regulamentação atual, a energia gerada pela unidade consumidora com micro ou minigeração é integralmente compensada no âmbito do SCEE com base no valor integral da tarifa de energia cobrada pela distribuidora, independentemente do porte do empreendimento (que deve observar o limite de 5MW) e da modalidade de geração, isto é, se junto à carga ou remota, ou se individual ou compartilhada.

No caso dos últimos, o PL nº 5.829/2019 estabelece a necessidade de cumprimento dos seguintes prazos para o início da injeção de energia, contados da data de emissão do parecer de acesso:

- 1- 120 dias para microgeradores, independentemente da fonte;
- 2- 12 meses para minigeradores de fonte solar; ou
- 3- 30 meses para minigeradores das demais fontes. A contagem desses prazos ficará suspensa em caso de pendências de responsabilidade da distribuidora ou na ocorrência de caso fortuito ou força maior.

A perda do atual regime ocorreria somente em caso de

- 1- encerramento da relação contratual com a distribuidora, exceto no caso de troca de titularidade, hipótese na qual o regime continuaria aplicável ao novo titular;
- 2- irregularidade no sistema de medição ou
- 3- solicitação de aumento da potência instalada ocorrida 12 meses após a publicação da lei, sendo essa perda aplicável apenas à parcela adicional à potência já instalada.

Para as unidades consumidoras que solicitarem o acesso depois de 12 meses da publicação da lei e classificadas como:

- 1- micro ou minigeração local;
- 2- geração compartilhada;
- 3- múltiplas unidades consumidoras;
- 4- geração a partir de fontes despachável;
- 5- geração não intermitente e

6- autoconsumo remoto limitado a até 500 kW de potência instalada, a parcela fio B da TUSD passa a ser custeada da seguinte forma:

Tabela 1: Percentual de custeio da parcela fio B. Fonte: Aneel, 2021.

	Percentual de custeio da parcela fio B da TUSD
a partir de 2023	15%
a partir de 2024	30%
a partir de 2025	45%
a partir de 2026	60%
a partir de 2027	75%
a partir de 2028	90%
de 2029 em diante	100%

Já a Resolução Normativa ANEEL N° 482/2012 tem por objetivo estimular a geração distribuída de energia elétrica por micro (até 100 kW) e minigeradores (entre 100 kW e 1 MW) para consumo próprio, bem como criar e regular um sistema de compensação, conhecido também como “net metering”, entre energia gerada e consumida pelo consumidor/gerador diretamente conectado ao sistema de distribuição. Assim, consumidores podem injetar energia na rede de distribuição, reduzindo tal montante do valor que é mensalmente faturado pelo distribuidor.

No final de 2013, ocorreu o primeiro Leilão de Energia (A-3), cujos empreendimentos de geração fotovoltaica, com potência igual ou superior a 5 MW, foram habilitados pelo EPE (Empresa de Pesquisa Energética). O leilão foi destinado à compra de energia de novos empreendimentos de geração eólica, solar e termelétrica a biomassa ou a gás natural em ciclo combinado, para início de suprimento a partir de janeiro de 2016. Esses leilões tiveram com resultado a nova A-3 e A-4 do dia 8 de julho de 2021 foi confirmado pela diretoria da Agência Nacional de Energia Elétrica na reunião do dia 26 de outubro de 2021. Nos certames foram negociados contratos de usinas de fontes hídrica, eólica, solar fotovoltaica e térmica a biomassa, com início de suprimento em 1º de janeiro de 2024 e 1º de janeiro de 2025, respectivamente.

Atualmente vários fabricantes já procuram o território Brasileiro para instalação e produção de módulos fotovoltaicos, um exemplo é a fabricante BYD chinesa que se instalou em Campinas e desenvolve novas tecnologias para painéis fotovoltaicos. Os

custos para utilização da energia solar têm apresentado reduções significativas, fazendo com que a geração fotovoltaica já comece a se tornar competitiva com relação a algumas fontes de geração de eletricidade (GONZALEZ, 2010).

Apesar da aprovação da nova lei 14.300/2022, criando a regulamentação necessária para que os consumidores de energia elétrica possam ser também geradores de energia, falta ainda muita transparência e acessibilidade nas informações da política fiscal para que ela se torne esse potencial acessível à população. (ANEEL, 2022).

Na Figura 24 estão apresentadas as etapas e prazos para instalação e regulamentação de instalação, segundo a resolução ANEEL N° 482/2012, e segue com o mesmo fluxo sem modificações.



Figura 24 . Etapas e prazos do procedimento de acesso que devem ser seguidos pelo consumidor e pela distribuidora . Fonte: Caderno temático ANEEL, 2014.

Os custos relativos às adequações do sistema de medição necessárias para implantação do sistema de compensação de energia elétrica são de responsabilidade do acessante, devendo ser ressarcidos à distribuidora acessada (ANEEL, 2014).

Vale ressaltar que a definição da cobrança de impostos e tributos federais e estaduais foge das competências da ANEEL. Um imposto aplicável à energia elétrica é o ICMS - Circulação de Mercadorias e Serviços, que é um tributo estadual.

Outro imposto cobrado em cima da energia é o PIS - Programa de Integração Social cobrado e o COFINS - Contribuição para o Financiamento da Seguridade

Social cobrado, que para o cálculo do montante de imposto a pagar, é aplicado a tarifa final dos impostos (PIS/COFINS e ICMS) para todo o consumo.

Uma informação importante disponível no site da ANEEL é a Agenda Regulatória para o biênio 2022-2023, aprovada por meio da Portaria nº 6.705, de 7/12/2021, apresenta a relação das atividades regulatórias que serão objeto de regulamentação ou estudo nesse ciclo. Para cada atividade é apresentado seu cronograma, prioridade e responsáveis pelo processo, entre outras informações. As atividades apontadas como indicativas são aquelas que deverão ter entregas apenas no segundo ano da Agenda Regulatória. Como exemplo, temos: aprimorar a Resolução Normativa nº 482/2012, que trata de micro e minigeração distribuída; consolidação dos atos normativos relativos à pertinência temática “Direitos do usuário do serviço público de distribuição de energia elétrica”; e que trata da consolidação das normas referentes aos requisitos e procedimentos para outorga das fontes eólicas, termelétricas e fotovoltaica.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Sistema de simulação

Os sistemas *off-grid* ainda não são muito populares no Brasil, pelo alto custo das baterias necessárias para realizar o armazenamento da energia gerada. Por outro lado, vários países da Europa já aprovaram isenções fiscais para este tipo de sistema, visando fomentar sua disseminação, uma vez que o mundo já observa os benefícios econômicos que a energia solar fotovoltaica *off-grid* pode oferecer.

Este tipo de sistema fotovoltaico gera energia elétrica independentemente da rede elétrica da distribuidora. Esta energia é acumulada em um banco de baterias e, posteriormente, disponibilizada para uso, em corrente contínua ou em corrente alternada, através de um inversor.

No presente trabalho, buscou-se construir e testar um microsistema *off-grid*, avaliando variáveis de funcionamento com dois tipos de baterias, chumbo-ácido e íon-lítio. O sistema montado é composto por painel solar, controlador de carga, baterias, instrumentação para medição e coleta de parâmetros elétricos (correntes, tensões) e cargas (lâmpadas DC).

4.1.1 Materiais utilizados

4.1.1.1 Painel solar 30 W

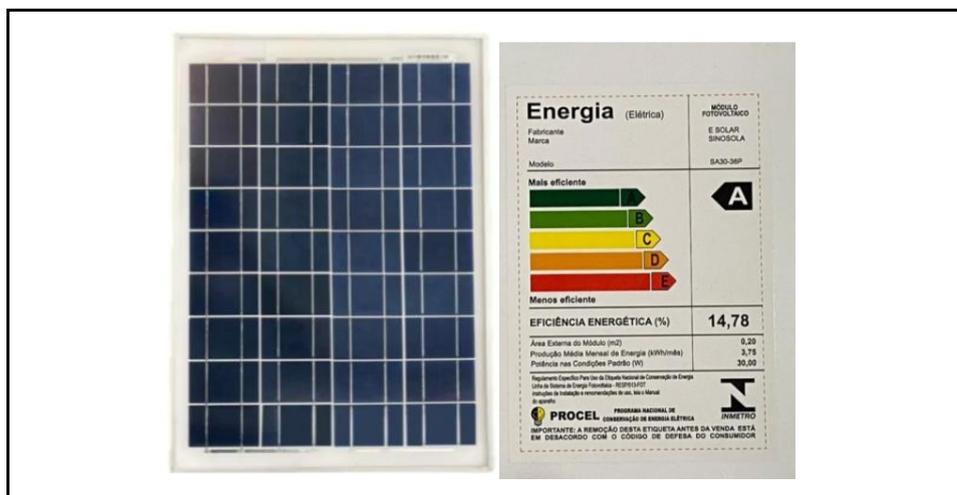


Figura 25. Painel solar fotovoltaico Sinosolar SA30-36P (30Wp).
Fonte: Mais Solar.

Este painel, de pequeno porte, é bastante utilizado nos setores comercial e industrial para aplicações de baixo consumo de energia. Dentre as aplicações mais utilizadas, podemos destacar os sistemas de monitoramento meteorológicos urbanos e rurais, controle de tráfego em rodovias, segurança, iluminação e eletrificação rural.

A opção da tecnologia de energia solar fotovoltaica para fornecer energia elétrica é uma alternativa amigável ao meio ambiente, economizando investimentos em comparação a configuração de rede elétrica de longa distância, além de ter menores gastos de operação e manutenção do sistema. Sua modularidade e pouca quantidade de peças móveis permite instalação rápida em curtos prazos, sem a necessidade de grandes áreas físicas.

No sistema montado, as placas foram utilizadas para carregar as baterias.

4.1.1.2 Disjuntor



Figura 26. Disjuntor Lukma/ DZ47/ Unipolar/ 63A.

Os disjuntores são dispositivos eletromecânicos de segurança que desarmam a rede elétrica de determinado circuito em caso de sobrecarga e de curto-circuito. Além de manter a integridade da isolação, garantindo a vida útil dos condutores, o disjuntor proporciona um funcionamento adequado da instalação e dos equipamentos a ela conectados. Por isso, são instalados no quadro de distribuição em número compatível com os circuitos e dimensionados conforme a potência de cada equipamento, número de lâmpadas e tomadas de cada circuito. No sistema montado, o disjuntor foi instalado entre a placa solar e o controlador como dispositivo de interrupção da corrente elétrica, tipo liga/desliga, para que se controlasse o período de carregamento das baterias, ao longo dos testes.

4.1.1.3 Controlador de Carga solar fotovoltaico



Figura 27. Controlador de carga solar fotovoltaico PWM RBL-30A-LI 30A.

Os dois controladores de carga, instalados entre os painéis solares e as baterias, modelos idênticos **PWM RBL-30A-LI 30A**, foram utilizados para controlar a tensão de entrada nas baterias, evitando-se sobrecargas ou descargas excessivas, otimizando e prolongando a sua vida útil. Sua aplicação, neste trabalho, foi como parte de um protótipo de sistema fotovoltaico residencial isolado, mas também é muito utilizado em comunidades isoladas, sistemas de iluminação e sinalização, eletrificação rural, segurança e monitoramento, estações de transmissão, sistemas emergenciais, sistemas de telecomunicações, veículos móveis (*trailers* e *motor home*), barcos e embarcações.

O controlador tem uma função *timer* que permite que o usuário realize programações como: momento em que o controlador irá ligar ou desligar o sistema fotovoltaico; e monitoramento do status da bateria (carga, absorção e flutuação), otimizando o sistema. Possui um display em LCD que permite visualizar outros parâmetros como energia produzida pelo painel solar, capacidade da bateria e consumo da carga. Também possui uma função de compensação da temperatura, garantindo que a bateria seja carregada corretamente, otimizando seu desempenho e prolongando sua vida útil.

Segundo o fabricante, sua tecnologia de modulação por largura de pulso conhecida como PWM (*Pulse Width Modulation*, em inglês) consegue detectar automaticamente a tensão de operação do sistema e gerenciar a carga e descarga de energia da bateria. Além disso, possui sistema de proteção eletrônica que monitora a tensão da bateria, garantindo que não ocorra sobrecarga ou descarga total de energia; é programável e conta com duas saídas USB, sendo uma escolha adequada para sistemas solares fotovoltaicos off-grid (isolados, com bateria); e trabalha com corrente nominal de 30 A, tanto em 12 VCC quanto em 24 VCC, com reconhecimento automático. Também está em conformidade com normas internacionais.

Sua configuração padrão de fábrica, por segurança, é "B2" (para baterias de íon-lítio). Para utilizá-lo com bateria de chumbo-ácido, foi necessário modificar a configuração para "B1".

4.1.1.4 Baterias

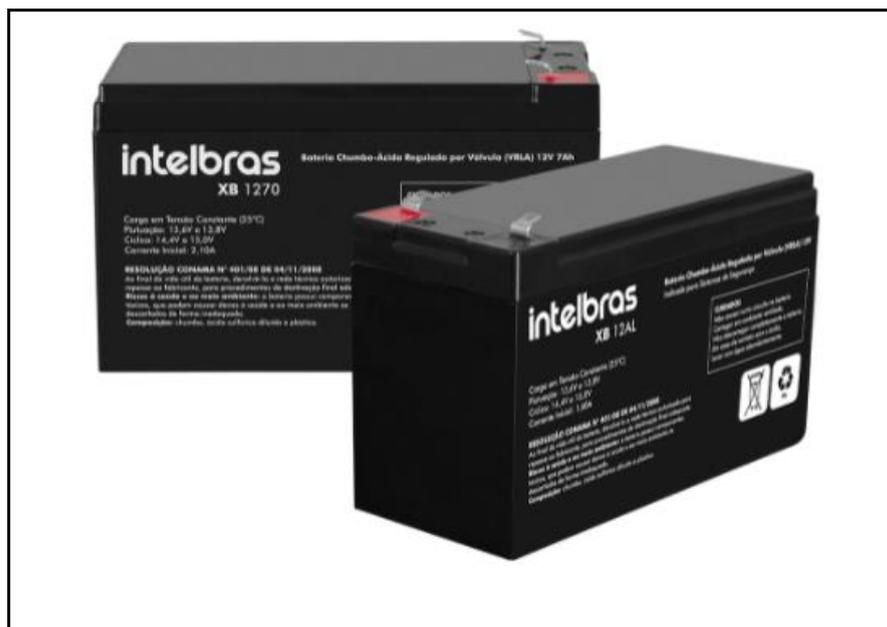


Figura 28. Bateria de chumbo-ácido selada, utilizada no conjunto montado. Fonte: autoria própria.

A bateria de chumbo-ácido escolhida foi o modelo Intelbras XB 1270, com tensão/capacidade nominais de 12V/7Ah, regulada por válvula selada VRLA, recarregável. Segundo o fabricante, é livre de manutenção, protegida contra vazamentos e com uma vida útil de até 5 anos, em regime de flutuação. A XB 1270 é adequada para o uso em *nobreaks*, equipamentos médicos, luzes de emergência e sistemas de segurança, entre outras aplicações especiais.

Com tensão de 12 VCC, capacidade de 7 Ah, a bateria XB 1270 foi desenvolvida, segundo o fabricante, para alimentar equipamentos de segurança eletrônica, informática e telecom. Por possuir chumbo em sua composição, a bateria XB 1270 faz parte do processo de logística reversa conduzido pelo fabricante e não deve ser descartada no lixo comum. Por isso, quando sua vida útil terminar ou, por algum motivo, a bateria não funcionar mais, deve retornar à rede de assistência técnica do fabricante, para ser reciclada.

- Regime de carga e descarga:

Segundo Libert, 2021, o tempo de vida de uma bateria também varia de acordo com o quanto ela é descarregada, a cada ciclo. Descargas profundas são prejudiciais para baterias de chumbo-ácido. A Figura 29 relaciona a tensão de corte na descarga da

bateria, com o tempo de autonomia, fornecendo a corrente de descarga. Exemplo: para uma tensão de corte de 9,6 VCC, indicada na primeira coluna, e uma autonomia de 5 minutos, teremos uma corrente de descarga de 26,23 A.

Características de descarga (A) (25 °C)												
F.V / Tempo	5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	1 h	2 h	3 h	5 h	8 h	10 h	20 h
9,60 V	26,23	17,20	12,81	6,818	4,322	2,643	1,742	1,418	1,166	0,768	0,655	0,356
10,0 V	25,28	16,77	12,40	6,730	4,256	2,590	1,709	1,398	1,155	0,765	0,658	0,353
10,2 V	23,80	15,94	12,05	6,628	4,224	2,562	1,694	1,384	1,148	0,758	0,648	0,343
10,5 V	21,39	14,90	11,37	6,445	4,172	2,529	1,679	1,364	1,138	0,751	0,645	0,336
10,8 V	19,17	13,90	10,73	6,232	4,114	2,508	1,659	1,317	1,133	0,748	0,634	0,322
11,1 V	16,77	12,74	9,90	5,995	4,016	2,407	1,627	1,298	1,128	0,742	0,624	0,317

Valores médios (tolerância de ± 2%)

Figura 29. Exemplos de valores de descarga estabelecidos pelo fabricante. Fonte: Intelbras (data).

- Número de ciclo de carga e descarga:

Segundo a NBR 15254 (2005) a duração da bateria - ou vida útil, ou tempo de vida - é o tempo de vida em que a capacidade efetiva da bateria atinge 80% de sua capacidade nominal, e que é influenciado de diferentes formas. A bateria XB 1270 (selada), utilizada neste trabalho, possui um número limitado de ciclos de carga, que depende da profundidade da descarga, conforme apresentado na Figura 30. Quanto mais profunda for a descarga, menor o número de ciclos possíveis, devido às características construtivas das placas.

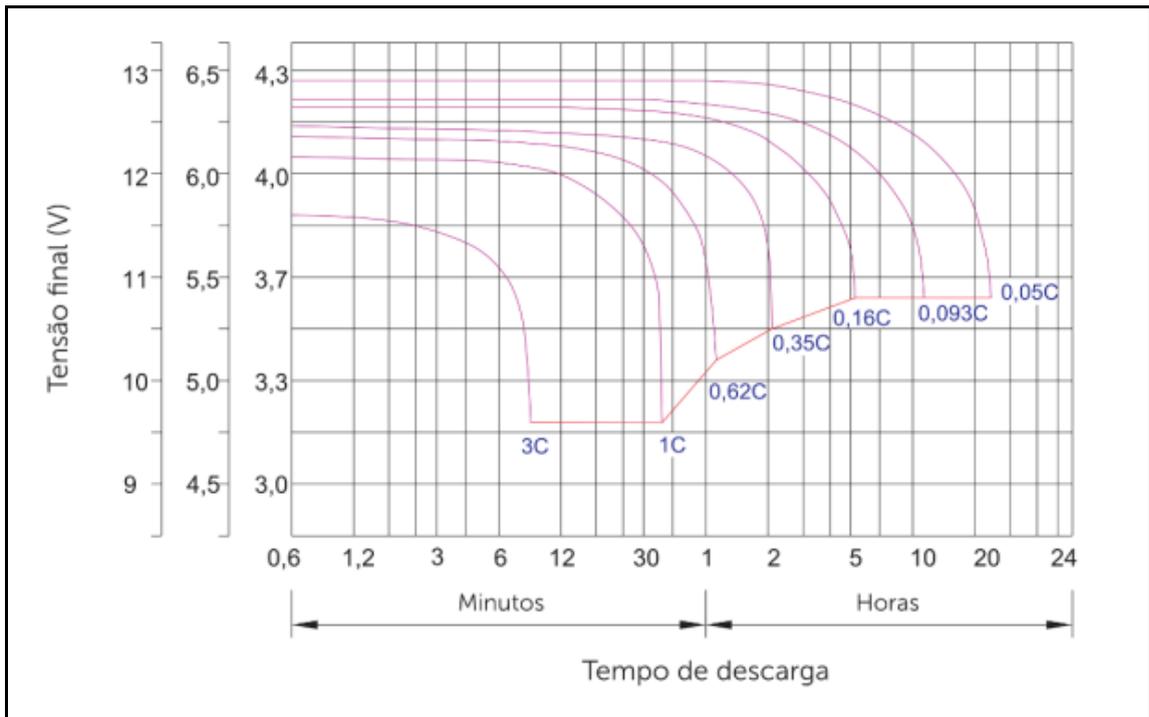


Figura 30. Ciclos de carga e descarga em função da profundidade de descarga. Fonte: Intelbras (2020).

- Pack de Bateria Íon- lítio

As baterias de íon-lítio são uma tecnologia relativamente recente, com crescimento exponencial de utilização. O lítio tem o maior potencial eletroquímico e fornece a maior densidade de energia por massa, quando comparado a outros metais utilizados em baterias. As baterias de íon-lítio oferecem inúmeras vantagens quando comparadas às células à base de níquel. A primeira vantagem é o tamanho: as células de lítio são bem menores e muito mais leves, além de apresentar uma densidade energética muito maior. Estas baterias foram projetadas para operar dentro de uma faixa de temperatura muito maior. A principal desvantagem ainda é seu elevado custo.

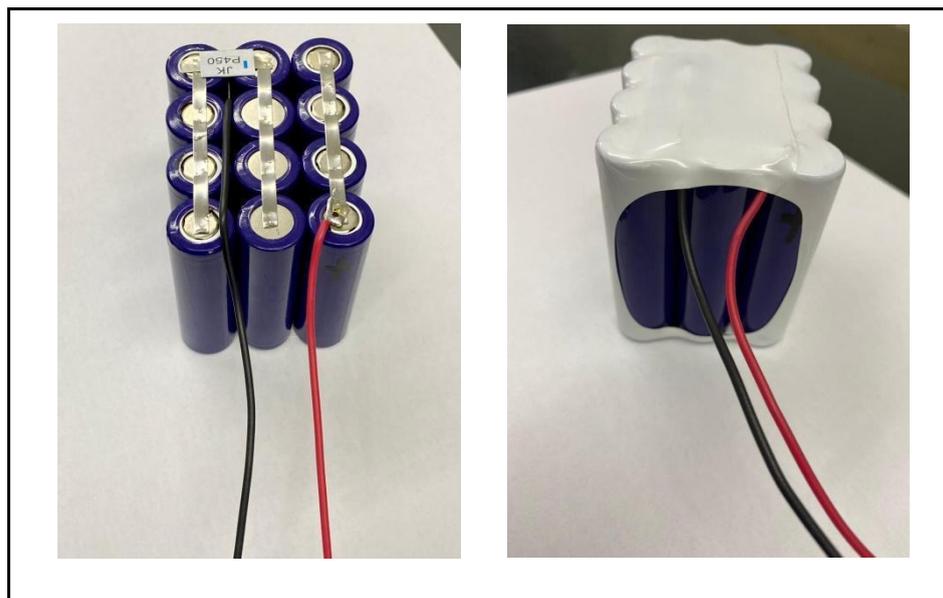


Figura 31. Pack de Bateria ìon-lítio BAP Energy 18650. Fonte: autoria pr3pria.

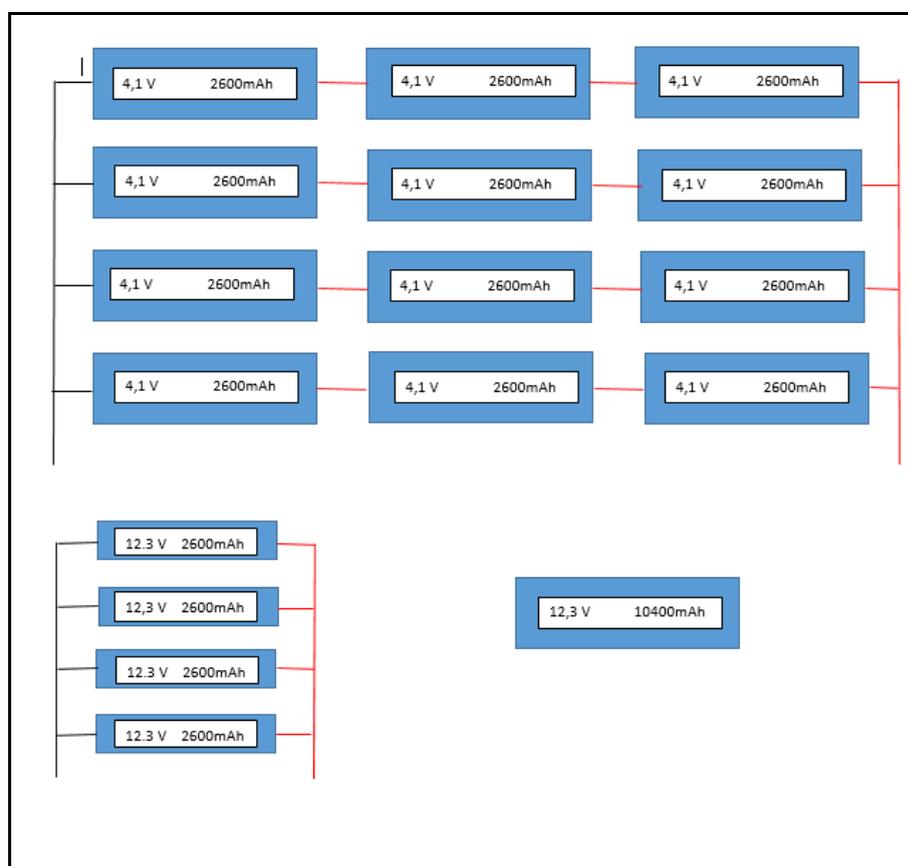


Figura 32 . Esquema de ligaç3o das c3lulas no pack de baterias ìon-lítio. Fonte: autoria pr3pria.

4.1.2 Cabos condutores de energia

Cabos condutores de energia são utilizados para transmitir a corrente elétrica para toda a casa, a partir da entrada principal. Eles apresentam diversas bitolas, com diferentes cores que servem para identificar tensões padronizadas (AC: fase, neutro, terra; e DC: positiva e negativa).

Os projetos de condutores de rede elétrica devem obedecer à Norma NBR 5410. No caso do sistema montado neste trabalho, foram utilizados fios condutores nas cores preto (negativo) e vermelho (positivo).

O dimensionamento de um condutor deve ser precedido de uma análise detalhada das condições de sua instalação e da carga a ser suprida. Um condutor mal dimensionado, além de implicar em operação inadequada da carga, representa um elevado risco de incêndio no local.

4.1.2.1 Interruptor da carga



Figura 33. Interruptor simples. Fonte: Mercado livre.

Como o próprio nome sugere, a principal função de um interruptor é bloquear a passagem da energia elétrica de um ponto a outro. Por isso, o dispositivo atua ligando ou desligando determinado circuito elétrico - permitindo ou não a circulação da corrente elétrica. No sistema montado, o interruptor foi instalado entre a saída 12 VCC do controlador e as cargas, sendo utilizado para ligar as cargas no momento em que o Arduino fazia as leituras de tensão e corrente.

4.1.2.2 Carga (lâmpadas)

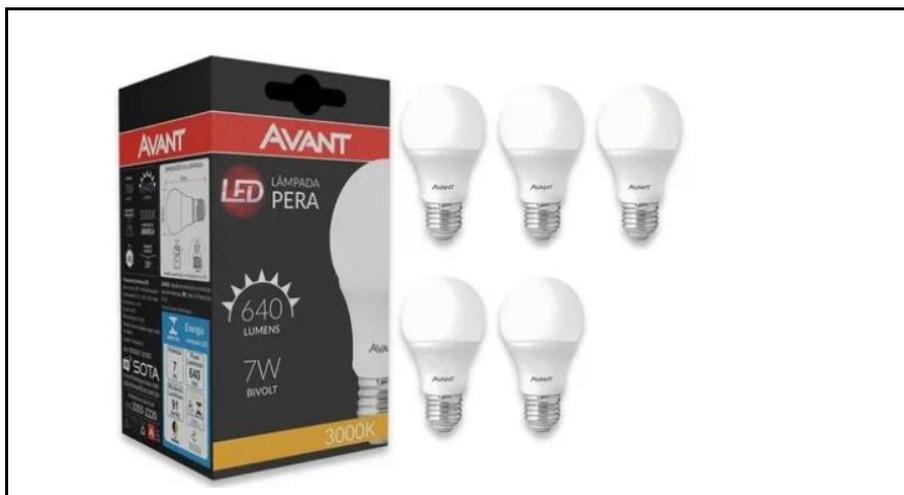


Figura 34. Lâmpada Avant 12 VDC (7W), branca. Fonte: Mercado livre Para a carga, foram escolhidas lâmpadas LED Avant, 12 VDC, evitando-se o uso de inversor 12 VDC \rightarrow 220 VAC.

Foram compradas 8 lâmpadas e seus consumos de corrente foram medidos, seleccionando-se as 6 com consumo mais próximo, dentro da faixa de 0,6 A \pm 0,01 A, totalizando 1,8 A de consumo nominal.

4.1.2.3 Sensor de corrente



Figura 35. Sensor de corrente, tipo Hall, modelo ACS712 (até 5 A). Fonte: autoria própria.

Utilizado para realizar medições de corrente de forma precisa, o sensor de corrente ACS712 utiliza o Efeito Hall para detectar o campo magnético gerado pela passagem de uma corrente elétrica por um circuito, gerando uma tensão proporcional, na saída do módulo.

O sensor de corrente ACS712 pode ser utilizado tanto com corrente alternada quanto com corrente contínua. Os bornes de ligação ao circuito de potência são completamente isolados da saída de tensão para o microcontrolador, o que garante

segurança.

CI ACS712 Allegro	
Faixa de medição	-5A a +5A
Alimentação	5V
Tempo de resposta	5 μ s
Saída analógica proporcional	185mV/A
Dimensões	30 x 12 x 12mm

Figura 36. Especificações do sensor ACS712.

4.1.2.4 Multímetro



Figura 37. Multímetro digital Hikari HM-1001. Fonte: autoria própria.

Um multímetro é uma ferramenta destinada a medir e avaliar grandezas elétricas. Com o modelo utilizado, é possível a medição de tensões DC, AC, além de corrente DC, resistência e testes de diodo e continuidade. Como características adicionais, possui gerador de onda quadrada, teste de transistores (hFE) e indicador de bateria fraca.

No sistema, o multímetro foi utilizado para conferir tensões das baterias e correntes nas lâmpadas, além dos valores dos resistores nos circuitos montados para as medições.

4.1.2.5 Arduino

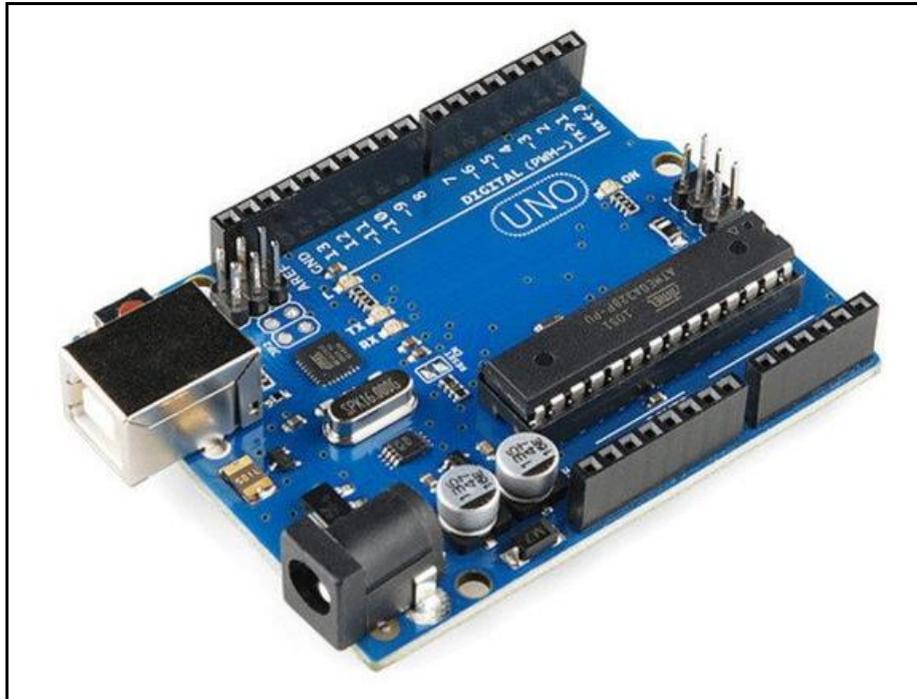
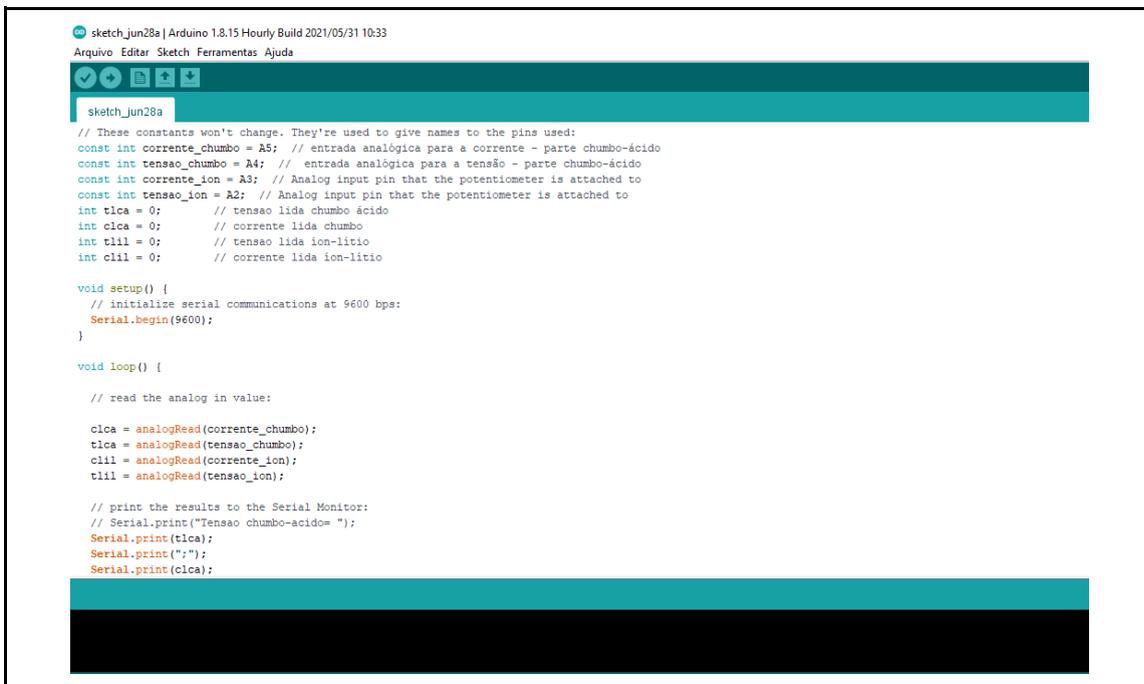


Figura 38. Arduino UNO R3. Fonte: autoria própria.

Em termos gerais, o Arduino é um placa composta por um microcontrolador ATMEL e um hardware livre. A placa conta com suporte de entrada/saída embutido (o que nos permite facilmente conectá-lo no computador). Sua linguagem de programação é baseada em C/C++. Pode ser usado de maneira independente, para controlar diversos equipamentos ou, até mesmo, criar outros.

Existem diversos sensores e componentes desenvolvidos para o uso com placas Arduino. Essa variedade permite que funcione, também, como aparelho de medição, que foi o caso de uso desse componente no presente trabalho. Com um Arduino conectado a um circuito específico e, ligado ao computador por uma comunicação serial, foi possível realizar medições precisas de tensão e corrente ao longo de período de descarga da bateria.

4.1.2.6 Sistema de monitoramento



```

sketch_jun28a | Arduino 1.8.15 Hourly Build 2021/05/31 10:33
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

sketch_jun28a

// These constants won't change. They're used to give names to the pins used:
const int corrente_chumbo = A5; // entrada analógica para a corrente - parte chumbo-ácido
const int tensao_chumbo = A4; // entrada analógica para a tensão - parte chumbo-ácido
const int corrente_ion = A3; // Analog input pin that the potentiometer is attached to
const int tensao_ion = A2; // Analog input pin that the potentiometer is attached to
int t1ca = 0; // tensao lida chumbo ácido
int c1ca = 0; // corrente lida chumbo
int t1il = 0; // tensao lida ion-litio
int c1il = 0; // corrente lida ion-litio

void setup() {
  // initialize serial communications at 9600 bps:
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

  // read the analog in value:

  c1ca = analogRead(corrente_chumbo);
  t1ca = analogRead(tensao_chumbo);
  c1il = analogRead(corrente_ion);
  t1il = analogRead(tensao_ion);

  // print the results to the Serial Monitor:
  Serial.print("Tensao chumbo-ácido= ");
  Serial.print(t1ca);
  Serial.print("\n");
  Serial.print(c1ca);

```

Figura 39. Código elaborado no ambiente Arduino, para monitoramento de tensão e corrente. Fonte: autoria própria.

O Arduino IDE (*Integrated Development Environment*, em inglês) é um ambiente de desenvolvimento de software que contém um editor de texto para escrever código, uma área de mensagem, um console de texto, uma barra de ferramentas com botões para funções comuns e uma série de menus. Ele se conecta a placas eletrônicas microcontroladas compatíveis com a linha Arduino, permitindo *upload* de programas e comunicação online. A IDE do Arduino é *open-source*. Seu ambiente gráfico foi desenvolvido em Java e baseado em *Processing* e outras linguagens *open-source*. No portal oficial do Arduino (arduino.cc), é possível fazer download da última versão da IDE e instalar em computadores.

A linguagem de programação utilizada para escrever os códigos para Arduino é baseada nas tradicionais C/C++ (com modificações) e possui um grau de abstração muito alto, além de uma série de bibliotecas que encapsulam a maior parte da complexidade de utilização de um microcontrolador.

No sistema montado, um código Arduino foi utilizado para fazer as leituras durante as simulações de descarga, sendo realizadas capturas de tensão da bateria e corrente de descarga, a cada 30 segundos, durante 3 horas e 5 minutos. O código desenvolvido apresentado no o Anexo I.

4.1.2.7 Divisor de tensão

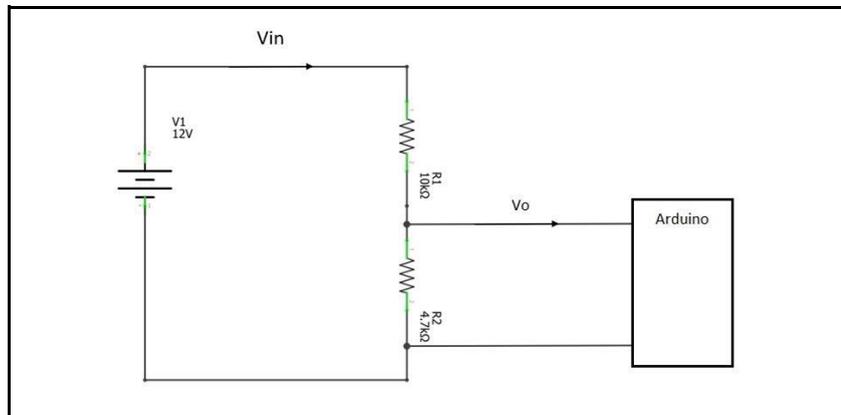


Figura 40. Esquema do divisor de tensão utilizado. Fonte: Autoria própria.

$$V_0 = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

Um divisor de tensão é um circuito simples de resistores em série. A tensão de saída é uma fração fixa da tensão de entrada, representada pela Equação 5. Divisores de tensão foram necessários para uma compatibilização entre a faixa de tensão das baterias (em torno de 12 VCC) com a tensão de entrada do Arduino (máximo de 5 VCC).

4.1.2.8 Protoboard

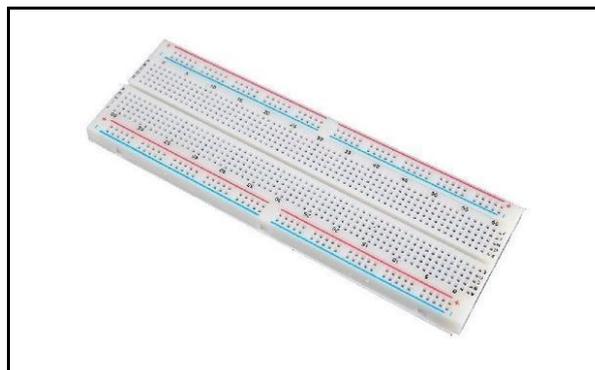


Figura 41. Protoboard 830 pontos. Fonte: Mercado livre.

Uma placa de ensaio ou matriz de contato (*protoboard*, em inglês) é uma placa com furos e conexões condutoras, utilizada para a montagem de protótipos e projetos eletrônicos em estágio inicial. É utilizada para suportar os componentes sem a necessidade de soldagens, facilitando a criação de protótipos. No sistema montado, a

placa foi utilizada para conectar os divisores de tensão, para as leituras realizadas com o Arduino.

- **Fios de ligação flexíveis (Cabo jumper macho)**

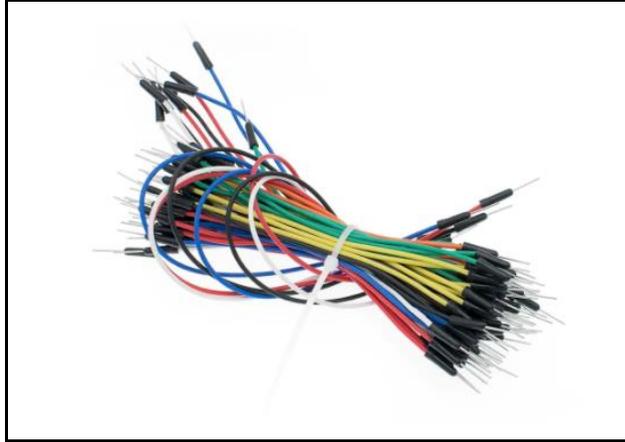


Figura 42. Cabos tipo *jumper*, macho-macho. Fonte: Mercado livre Os fios tipo *jumper* são cabinhos que funcionam como conexões elétricas em protótipos desenvolvidos em placas *protoboard*.

4.1.3 Montagem e funcionamento do sistema

Com os materiais supracitados, foi montado o sistema de testes mostrado na Figura 43, onde 3 lâmpadas LED 12 VCC, com consumo de 0,6 A cada, funcionaram como carga para o processo de descarga das baterias sob teste comparativo.

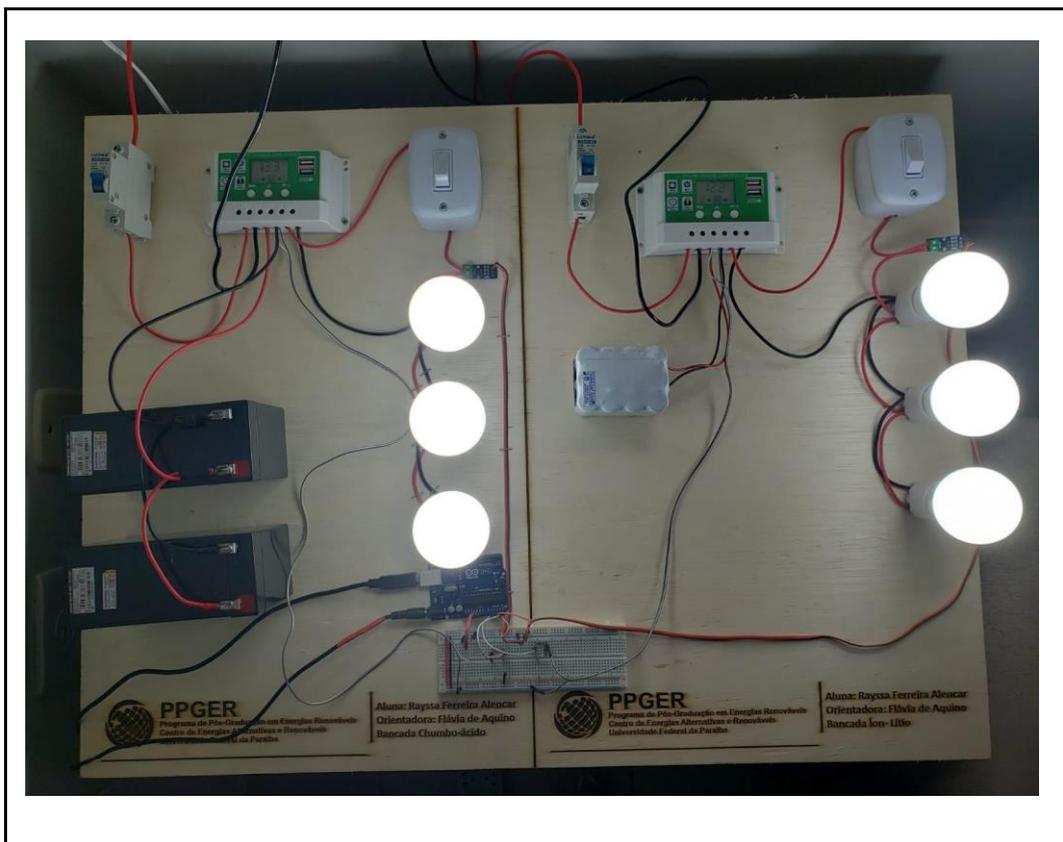


Figura 43 . Sistema proposto. Fonte: autoria Própria.

Foram montados dois sistemas com os mesmos materiais, diferindo entre eles apenas as baterias, que são objetos específicos do presente trabalho. Nas Figura 44 e 45 estão apresentados diagramas de blocos do sistema montado.

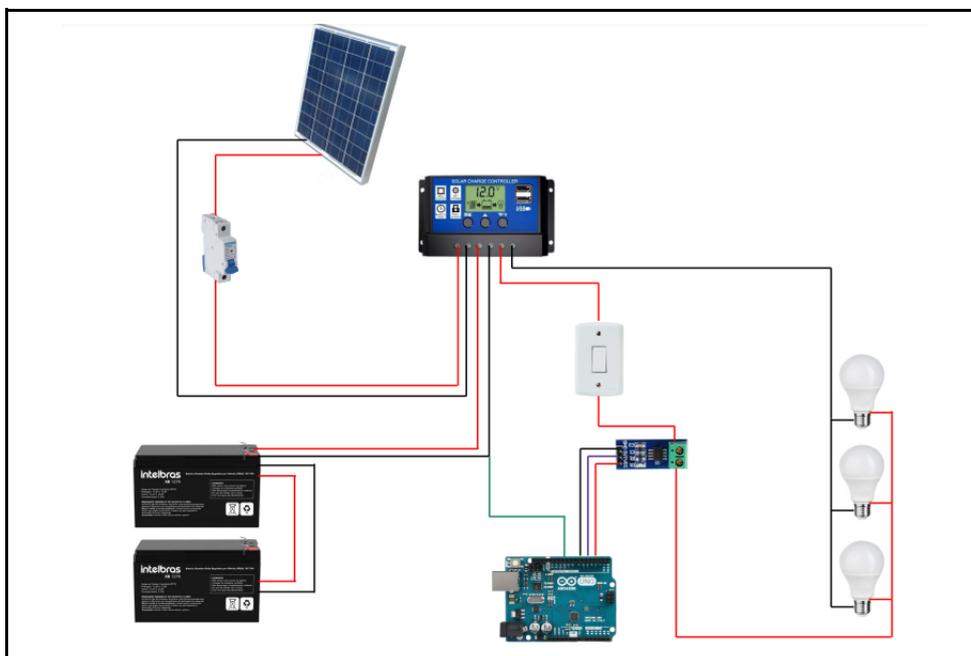


Figura 44 . Diagrama de blocos do sistema montado chumbo-ácido (CA). Fonte: autoria própria.

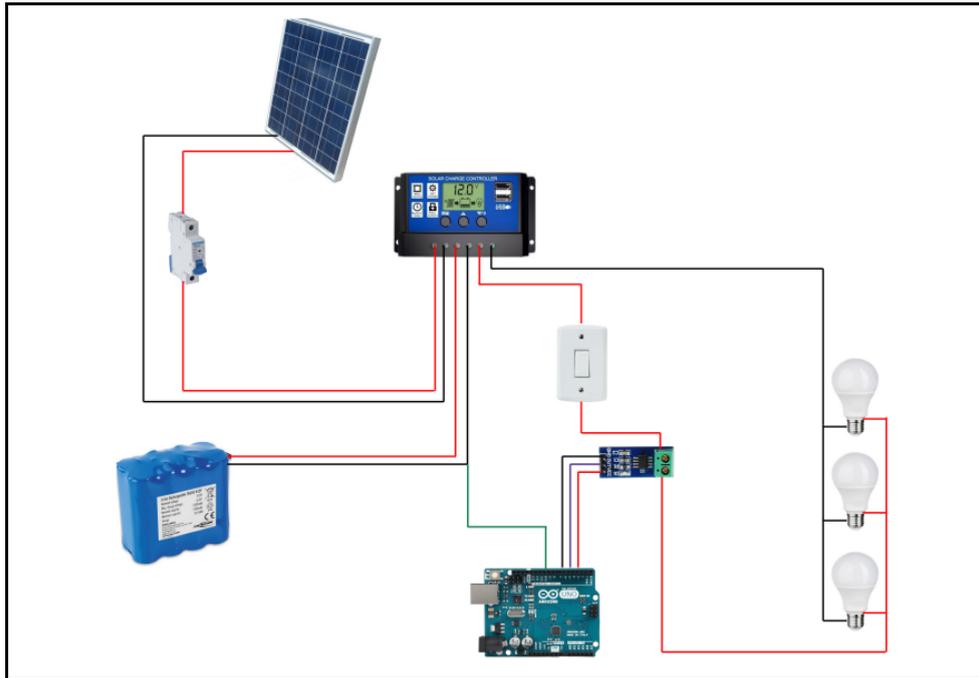


Figura 45 . Diagrama de blocos do sistema montado íon-lítio (LI). Fonte: autoria própria.

Na Figura 46 está apresentado um diagrama de blocos específico do sistema de monitoramento de correntes e tensões.

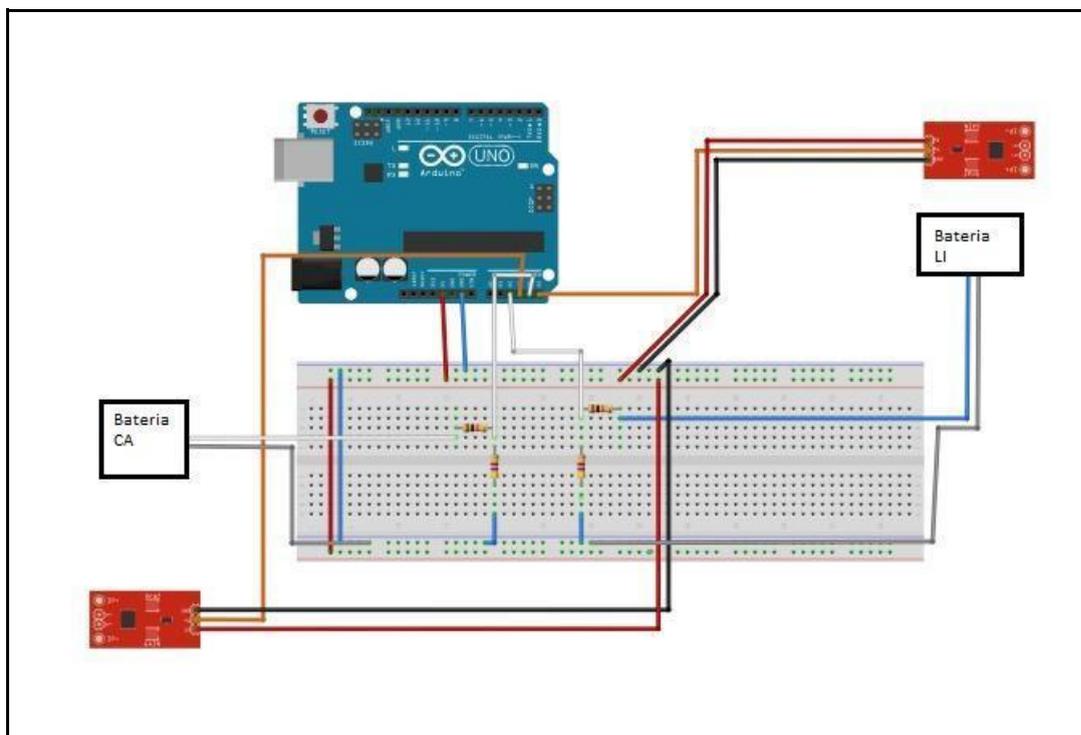


Figura 46. Sistema de monitoramento de correntes e tensões. Fonte: Própria.

4.2 Metodologia utilizada

GIL (2008) define a pesquisa como o processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico. O objetivo fundamental da pesquisa é descobrir respostas para problemas, mediante o emprego de procedimentos científicos.

A metodologia utilizada levou em consideração o descarregamento das baterias, em dois sistemas semelhantes, com a única diferença sendo o tipo de bateria (Chumbo ácido - CA ou íon- lítio LI). A seguir são apresentados os procedimentos realizados:

1) Antes de iniciar os testes, foi conectado o sistema de monitoramento, para leitura e armazenamento dos dados através do programa descrito (Arduino), cujos resultados foram armazenados em arquivos no computador;

2) As placas fotovoltaicas passavam o dia carregando as baterias;

3) Para a realização do ensaio de descarga, as baterias estavam em estado de flutuação, a plena carga;

4) Para iniciar os testes, os disjuntores de carga eram desligados, para evitar eventual carregamento simultâneo das placas, ou seja, para que não houvesse nenhuma corrente de entrada no sistema;

5) Foram anotados os valores iniciais de tensão de cada bateria, apresentados em cada um dos controladores de carga;

6) Após anotados os valores de tensão, o software era acionado, capturando-se os valores de tensão e corrente, descartando-se as oito primeiras leituras (preventivamente, para estabilização dos valores);

7) Em seguida, as cargas eram ligadas as cargas (lâmpadas), por meio dos interruptores;

8) Os dados de tensão das baterias e correntes das cargas (lâmpadas) foram coletados e salvos, em um período de 3 horas e 5 min, com leitura a cada 30 segundos;

9) Após esta leituras, as cargas eram desligadas e o sistema pausado;

Os passos 2 a 9 foram repetidos durante 10 dias, sendo que 7 destes dias foram escolhidos para os cálculos, uma vez que, em 3 dias o tempo estava nublado e as baterias não chegaram ao estado de flutuação.

O objetivo foi, por meio destes testes comparativos, utilizar-se dispositivos semelhantes ao máximo em ambos os sistemas, comparar o desempenho das baterias de íon-lítio e chumbo ácido, para uso *off-grid* residencial.

4. RESULTADOS

As análises feitas a partir dos dados coletados permitiram a elaboração de gráficos de médias. A cada dia, foram gerados 360 dados, a partir dos quais foram feitas médias de 10 dados consecutivos, obtendo-se 36 valores diários. Todos os gráficos gerados estão no Anexo II.

Para análise do resultado final, no Gráficos 1 e 2 são apresentadas as médias globais de todos os experimentos de tensão e corrente. Como o sistema a bateria de chumbo-ácido tem a capacidade de 14 Ah e o de íon-lítio, 10,4 Ah, foi considerada a proporção entre elas, chegando-se ao valor de 0,743. Todos os cálculos, foram levadas em consideração esta proporção.

Gráfico 1. Tensões das baterias, ao longo da descarga (média geral de 7 dias).

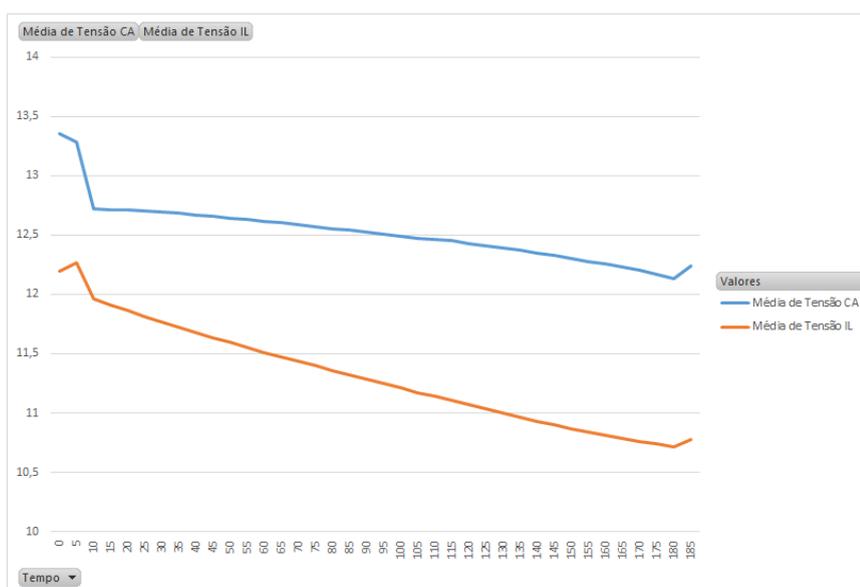
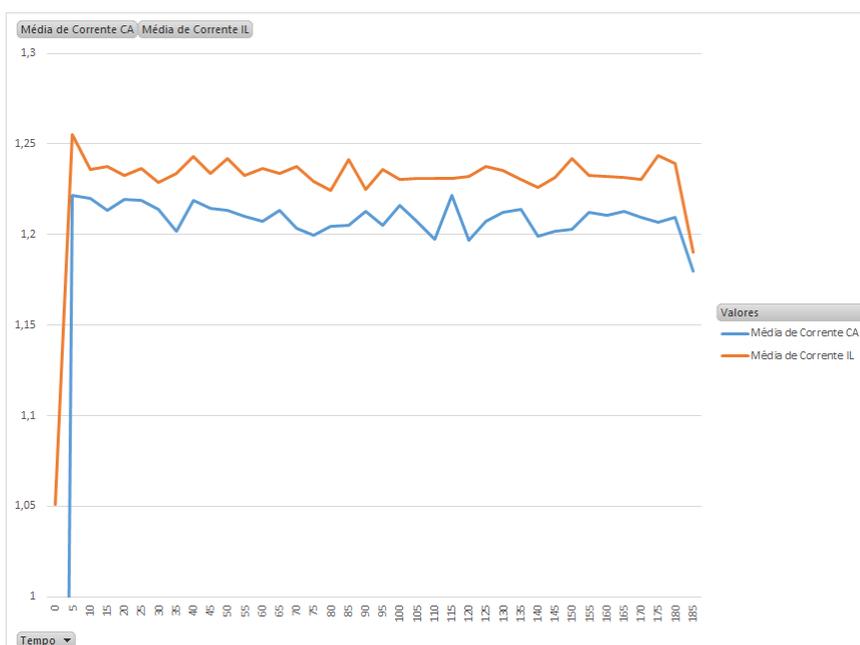


Gráfico 2. Correntes de descarga das baterias (média geral de 7 dias).



5. CONCLUSÃO

Levando-se em consideração a capacidade proporcional de cada uma das baterias, em ampère-hora, as quedas de tensão de ambas, na faixa estudada, foram lineares. As duas baterias, de acordo com os dados obtidos e análises realizadas, tiveram desempenho de descarga muito semelhante, com a queda de 10,21% para CA e 13,15% LI, com quedas de tensão próximas de 1,367 V para CA e 1,2 V para LI em média os sete dias de experimento, levando em consideração a proporcionalidade de 0,74 entre a bateria chumbo-ácido e íon-lítio.

Levando-se em consideração as análises das descargas realizadas no presente trabalho, podemos trazer alguns pontos positivos do íon-lítio:

- menor peso;
- menor volume;
- possibilidade (teórica) de poder passar por mais descargas profundas sem danificar sua vida útil.

Por outro lado, há algumas desvantagens, como confiabilidade das baterias utilizadas nos packs, pois não sabe a sua procedência nem se dispõe de manuais de especificações técnicas confiáveis, tampouco garantia; e dificuldade de montagem do pack, que é confeccionado por empresas especializadas, que cobram pelo serviço.

Já, para as baterias de chumbo-ácido, são pontos positivos:

- menor preço;
- maior disponibilidade e facilidade de aquisição no mercado nacional;

Outro fator para se levar em conta é o espaço disponível para armazenamento e instalação destas baterias, em um sistema residencial.

Para complementar a tomada de decisão sobre o tipo mais adequado de baterias para um sistema solar *off-grid*, foram feitas pesquisas em sites de venda on-line, que resultaram em médias de preços das baterias utilizadas no projeto, conforme Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Preços de baterias de CA. Fonte: pesquisa na internet, 20/11/2021.

Pesquisa de preço (lojas eletrônicas) Bateria Intelbras XB 1270 - 14A	Preços (sem frete)
Americanas	R\$ 82,03
Amazon	R\$ 114,86
Mercado Livre	R\$ 124,44
Casas Bahia	R\$ 144,76
ShopTelbras	R\$ 150,66
Magazine Luiza	R\$ 153,86
<i>Média</i>	R\$ 128,43
<i>Média, considerando-se duas baterias</i>	R\$ 256,87

Tabela 2. Preços de baterias de LI. Fonte: pesquisa na internet, 20/11/2021.

Pesquisa de preço (sites) Pack de bateria íon-lítio 18650- 10,4A	Preços (sem frete)
Samsung	R\$ 384,00
Philco	R\$ 390,00
Invictus	R\$ 468,00
Mondial	R\$ 540,00
Nitecore	R\$ 588,00
Tovatec	R\$ 660,00
<i>Média</i>	R\$ 505,00

Percebe-se que os valores das baterias LI são superiores aos das baterias CA, no entanto, além do custo, devem ser levadas em consideração outras características no momento da compra, como: peso, volume e capacidade de energia armazenada. Como explicado anteriormente, é difícil encontrar baterias LI já montadas com as características desejadas. Por outro lado, o mercado está em atualização permanente e, em breve, é possível que o mercado nacional disponibilize packs pré-montados confiáveis, como já acontece nos países europeus.

Considerando-se, portanto, todos os resultados deste trabalho, incluindo-se as questões técnicas (capacidade, confiabilidade) e comerciais (preço, disponibilidade) conclui-se que, para o caso de sistemas *off-grid* de pequeno porte, semelhantes ao montado e testado, a melhor opção de bateria é a de **Chumbo-Ácido**.

6. PESQUISAS FUTURAS

Por ser um trabalho de experimentação para a obtenção dos dados e análise dos mesmo, como sugestões para pesquisas futuras é sugerido aperfeiçoar o sistema implementando para novos testes:

- 1- fazer experimentação com mais dias de funcionamento e captação de dados;
- 1- a tecnologia da bateria íon-lítio mais próxima da capacidade da bateria chumbo-ácido, para não necessitar utilizar a proporcionalidade;
- 2- testar em diferentes regimes de carga (aumentando a quantidade de placas fotovoltaicas) e descarga (C10, C20, C30 ...);
- 3- fazer análises com o monitoramento de temperaturas na carga e descarga no banco de baterias;

Juntamente com uma simulação mais apurada, real e com mais obtenção de dados trabalhando a simulação por mais tempo de funcionamento. Será possível obter mais resultados para o estudo comparativo entre estes dois tipos de baterias para uso *off-grid* residencial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução normativa nº 482 de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília (Brasil), 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.; Brasil Ultrapassa 1,5 Gw De Energia Solar Fotovoltaica E Abastece Mais De 633 Mil Residências.; ABSOLAR.; 2018.

BASTOS, Renan Fernandes. Sistemas de Geração para carga e descarga de baterias(chumbo-ácido) e para buscar o ponto de máximo potência gerada em painéis fotovoltaicos empregados em sistemas de geração distribuída. Dissertação ,2013.

BLUE BOX BATTERIES. How Does Temperature Affect Lead Acid Batteries? 2015. Disponível em: <https://www.blueboxbatteries.co.uk/blog/how-does-temperature-affect-lead-acid-batteries-30>. Acesso em: 3 jul. 2021.

BUZATTO, Victor Hugo.; 800 mil moradias sociais do Reino Unido receberão painéis solares.; Sun Volt.; 2017.

COELHO,K.D. Estudo de uma Fonte Ininterrupta de corrente contínua de baixa potência gerenciada por um microcontrolador. Dissertação de Mestrado, UFSC,2011.

DJORDJEVIC, Aleksandar B.; KARANOVIC, Dusan M. Battery Testing with the Calculated Discharge Curve Method-3D Mathematical Model. Journal Of Power And Energy Engineering, [S.L.], v. 03, n. 01, p. 37-52, 2015. Scientific Research Publishing, Inc. DOI: 10.4236/jpee.2015.31004. Disponível em: https://file.scirp.org/pdf/JPEE_2015011513242266.pdf. Acesso em: 13 jul. 2021.

ELECTRIC CAR PARTS COMPANY. LiFePO4 Battery Pack. [S. L.]: Chinese Specifications, [20-]. Disponível em: <https://bityl.co/8Uca>. Acesso em: 31 jul. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Nota Técnica DEA 19/14: Inserção da geração fotovoltaica distribuída no Brasil: condicionantes e impactos. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

ENERTEC. Manual técnico: bateria estacionária FREEDOM®. Sorocaba: Enertec do Brasil, 2008.

FARAHANI, Shahin. Battery Life Analysis. In: FARAHANI, Shahin. ZigBee Wireless Networks and Transceivers. [S. L.]: Newnes, 2008. Cap. 6. p. 207-224.

GARCIA, Jose L. Electric power systems. In: CAPPELLETTI, Chantal; BATTISTINI, Simone; MALPHRUS, Benjamin K. (ed.). Cubesat Handbook: from mission design to operations. Academic Press, 2020. Cap. 9. p. 185-197.

GONZALEZ, M. P. O Mito do Alto Custo: Uma comparação entre a Energia Solar Fotovoltaica e a Energia Nuclear, Tese de Mestrado, UFABC, Santo André – SP, 2010.

GROIB, René. The influence of temperature on the operation of batteries and other electrochemical energy storage systems. [20–]. Disponível em: <https://www.basytec.de/Literatur/Temperature.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2021.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets. OECD/IEA. Paris, France, 2002.

IEA, adições líquidas de capacidade fotovoltaica solar, 2017-2019 , IEA, Paris.

JANNUZZI, G. M. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação, UNICAMP, Campinas – SP, 2009.

MA, Shuai et al. Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: a review. Progress In Natural Science: Materials International, [S.L.], v. 28, n. 6, p. 653-666, dez. 2018. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.pnsc.2018.11.002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002007118307536>. Acesso em: 3 jul. 2021.

LENG, Feng; TAN, Cher Ming; PECHT, Michael. Effect of Temperature on the Aging rate of Li Ion Battery Operating above Room Temperature. Scientific Reports, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 1-12, 6 ago. 2015. Springer Science and Business Media LLC. DOI: 10.1038/srep12967. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep12967.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2021.

Libert (S.D.). ACUMULADORES DE ENERGIA. Disponível em <file:///C:/Users/andre/Downloads/Aula%2011%20Acumuladores%20de%20Energia%20(3).pdf > Acessado em 9 de 2021.

LI, Qiuyan et al. Wide-Temperature Electrolytes for Lithium-Ion Batteries. Acs Applied Materials & Interfaces, [S.L.], v. 9, n. 22, p. 18826-18835, 30 maio 2017. American Chemical Society (ACS). DOI: 10.1021/acsami.7b04099.

MAIA, Rian Sardinha.; Energia Solar: O desenvolvimento de um novo mercado.; Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2018.

MEADOWS, C. The History of Lithium Ion Batteries. Demand Media, 1999-2012.

MENEZES, L. H. (2013). SISTEMA DE MONITORAMENTO PARA BATERIAS DO TIPO chumbo ácido.

MOURA. Manual Técnico Moura Acumuladores.2011.

MOEHLECKE et al. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Subsídios para Tomada de Decisão. Série Documentos técnicos 02-10: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília – DF, p.1- 42, 2010.

NAGASUBRAMANIAN, G. Electrical characteristics of 18650 Li-ion cells at low temperatures. Journal Of Applied Electrochemistry, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 99-104, 2001. Springer Science and Business Media LLC. DOI: 10.1023/a:1004113825283.

NATARAJ Baratha, JC. Overview of Energy Storage technologies for renewable energy. Vol 2, 2015.

NBR 14 205. Acumulador chumbo-ácido estacionário regular por válvula – Ensaios. 2002.

NÓBREGA, Balduino Sonildo da et al. Desempenho de um sistema solar fotovoltaico com diferentes inclinações e orientações azimutais em cidades da Paraíba. Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB.

NORTHERN ARIZONA WIND & SUN. Deep Cycle Battery FAQ. [20–]. Disponível em: <https://www.solar-electric.com/learning-center/deep-cycle-battery-faq.html>. Acesso em: 23 jul. 2021.

PEREZ, Richard. Lead-Acid Battery State of Charge vs. Voltage. Home Power, [S. L.], v. 1, n. 36, p. 66-69, 1993. Disponível em: https://www.scubaengineer.com/documents/lead_acid_battery_charging_graphs.pdf. Acesso em: 31 jul. 2021.

PESARAN, Ahmad; SANTHANAGOPALAN, Shriram; KIM, Gi-Heon. Addressing the Impact of Temperature Extremes on Large Format Li-Ion Batteries for Vehicle Applications. 2013. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58145.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2021.

PIERRO, B. Para aproveitar o sol: Estudo indica áreas favoráveis para explorar a energia solar no Brasil. Pesquisa Fapesp, São Paulo, n. 258, ago. 2017.

Política de incentivos fiscais (legislação) ANEEL. Informações Gerenciais, Ed. mar. 2014. Banco de Informações de Geração.

ROLLS BATTERY ENGINEERING. AGM Discharge Characteristics. 2014. Disponível em: <http://support.rollsbattery.com/en/support/solutions/articles/4346-agm-discharge-characteristics>. Acesso em: 11 jul. 2021.

Souza (1999). "Princípios de funcionamento e procedimentos de operação e manutenção de acumuladores elétricos " Souza /f.s e roselem, m.f.ng, apostila CPqD , pp4,1999.

SCROSATI, B.; GARCHE, J. Lithium batteries: Status, prospects and future. Elsevier B. V., Journal of Power Sources, 2010.

STEWART, D. Discovery of Lithium. Chemicol.com, 2012.

WONG, Y. S.; HURLEY, W. G.; WÖLFLE, W. H. Charge regimes for valve-regulated lead-acid batteries: performance overview inclusive of temperature compensation. Journal Of Power Sources, [S.L.], v. 183, n. 2, p. 783-791, set. 2008. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.05.069. Disponível em: http://www.nuigalway.ie/power_electronics/documents/jps_2008.pdf. Acesso em: 9 jul. 2021.

ZHANG, Caiping et al. Charging optimization in lithium-ion batteries based on temperature rise and charge time. Applied Energy, [S.L.], v. 194, p. 569-577, maio 2017. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.10.059.

ANEXO I

Programa utilizado para coleta de dados.

```
// These constants won't change. They're used to give names to the pins used:
const int corrente_chumbo = A5; // entrada analógica para a corrente - parte chumbo-
ácido
const int tensao_chumbo = A4; // entrada analógica para a tensão - parte chumbo-
ácido
const int corrente_ion = A3; // Analog input pin that the potentiometer is attached to
const int tensao_ion = A2; // Analog input pin that the potentiometer is attached to
int tlca = 0; // tensao lida chumbo ácido
int clca = 0; // corrente lida chumbo
int tlil = 0; // tensao lida íon-lítio
int clil = 0; // corrente lida íon-lítio

void setup() {
  // initialize serial communications at 9600 bps:
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

  // read the analog in value:

  clca = analogRead(corrente_chumbo);
  tlca = analogRead(tensao_chumbo);
  clil = analogRead(corrente_ion);
  tlil = analogRead(tensao_ion);

  // print the results to the Serial Monitor:
  // Serial.print("Tensao chumbo-acido= ");
  Serial.print(tlca);
  Serial.print(";");
  Serial.print(clca);
  Serial.print(";");
  Serial.print(tlil);
  Serial.print(";");
  Serial.print(clil);
  Serial.println(";");

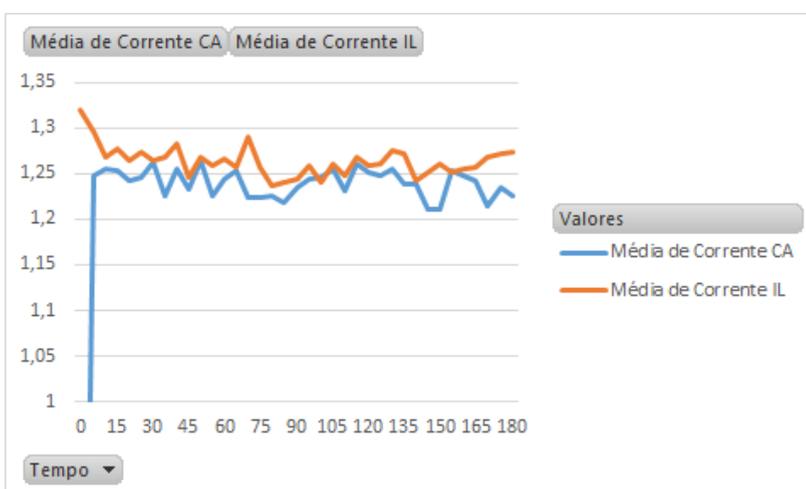
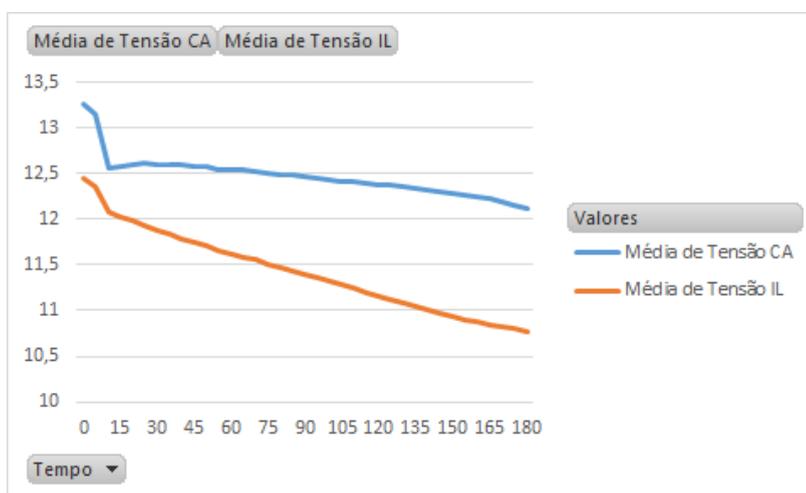
  delay(30000); // tempo, em milisegundos (30000 ms = 30s)

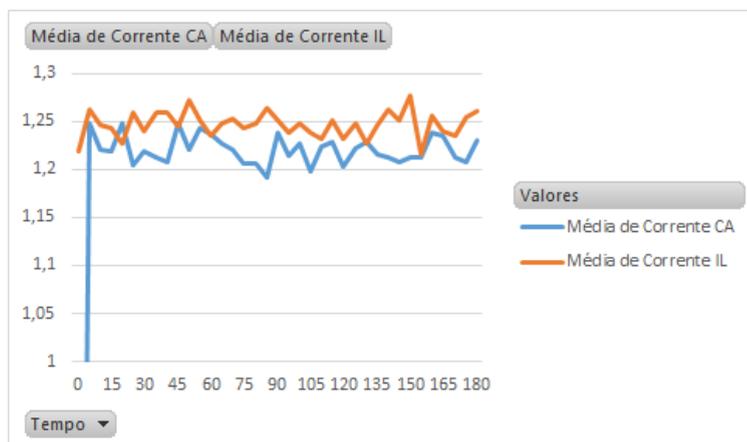
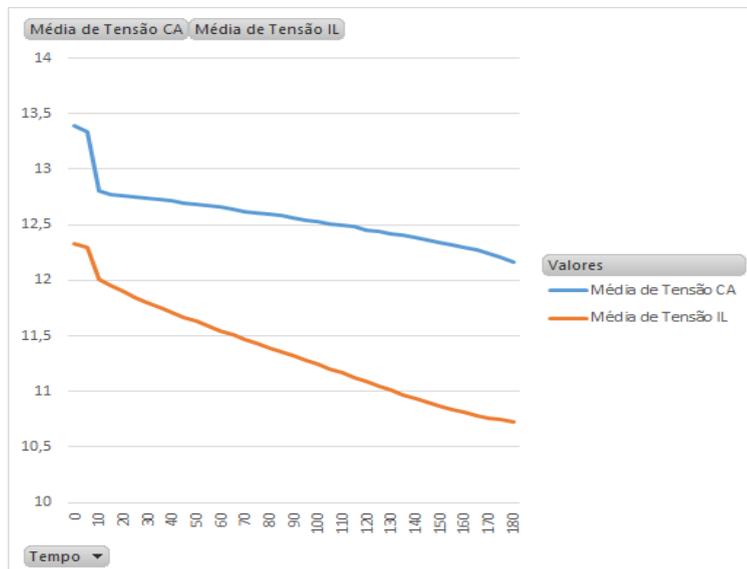
}
```

ANEXO II

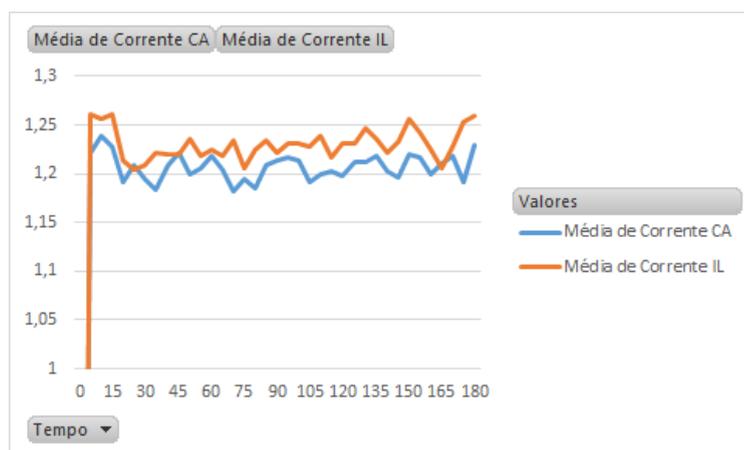
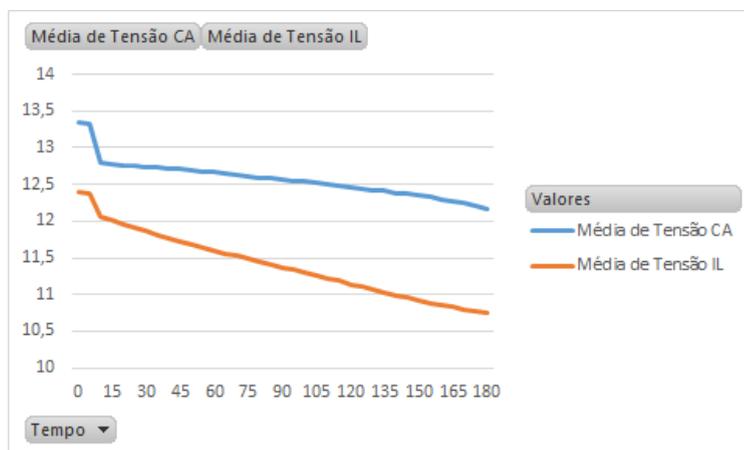
Gráficos de tensão e corrente CA e LI dos sete dias coletados.

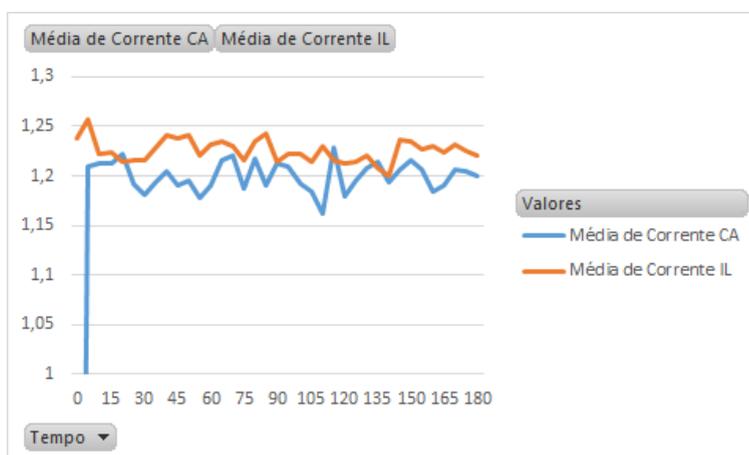
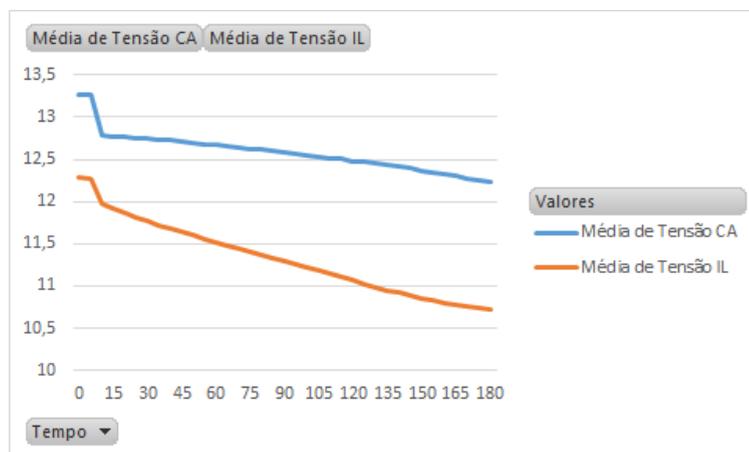
Dia 1



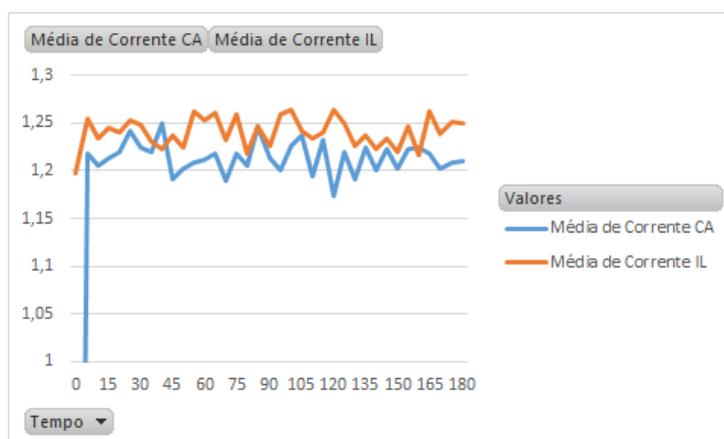
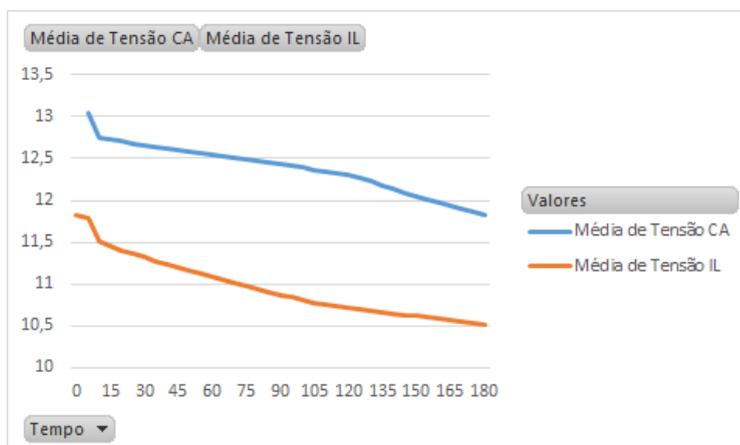
Dia 2

Dia 3

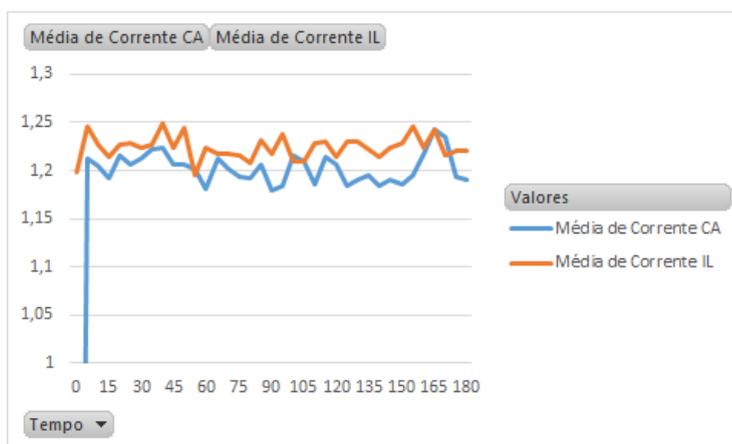
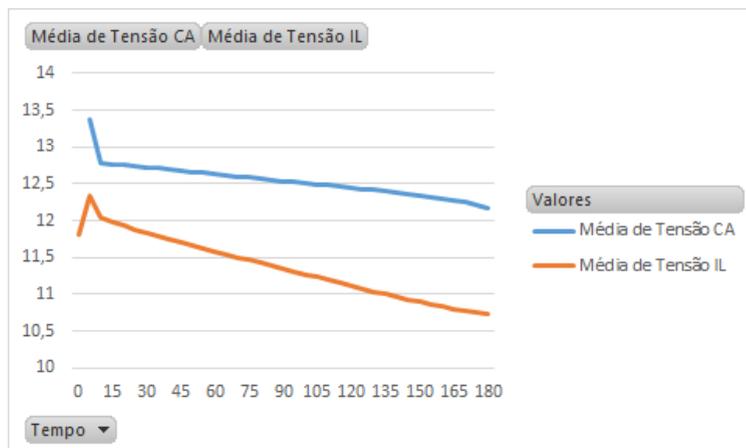


Dia 4

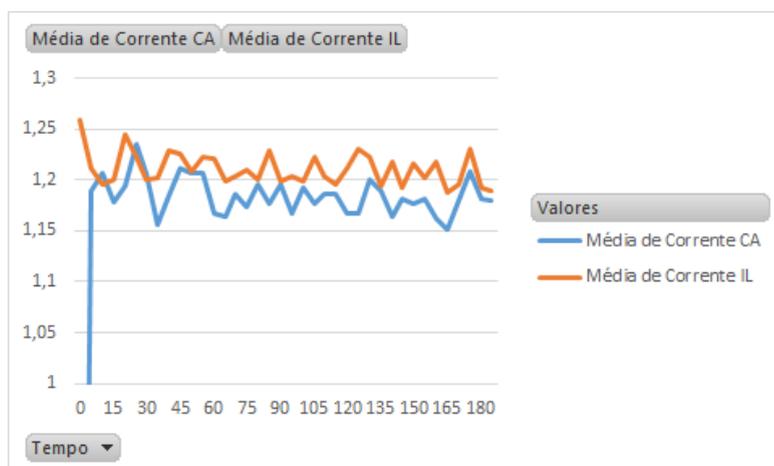
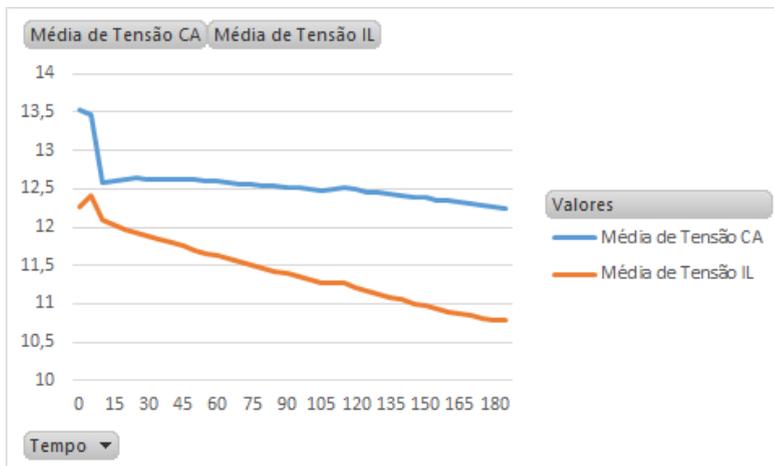
Dia 5



Dia 6



Dia 7



ANEXO III

Manual do controlador

Manual do Usuário

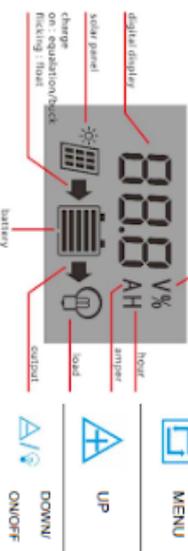
INSTRUÇÕES DE SEGURANÇA

1. Tenha certeza que sua bateria possui **Tensão suficiente** para o controlador reconhecer o tipo de bateria antes da primeira instalação.
2. O cabo da bateria deverá ser o menor possível para evitar perdas.
3. O regulador é adequado apenas para baterias de chumbo-ácido: **OPEN/AGM, GEL. Não é adequada para níquel metal hidreto, íons de lítio e outras baterias.**
4. O controlador solar é adequado apenas para regular módulos solares. **Nunca conecte outra fonte de carregamento ao controlador.**

CARACTERÍSTICAS

1. Micro controlador industrial embutido.
2. Mostador grande de LCD para ajustes de parâmetros.
3. Gerenciamento de cargas PWM de 4 estágios completo.
4. Proteção para curto circuito, para circuito aberto, proteção reversa e proteção para sobrecarga.
5. Proteção Dupla para corrente reversa motetel e baixa geração de calor.

MOSTRADOR LCD / BOTÕES



MENU : alternar entre os diferentes mostradores ou ENTRAR/SAIR das configurações segurando apertado.

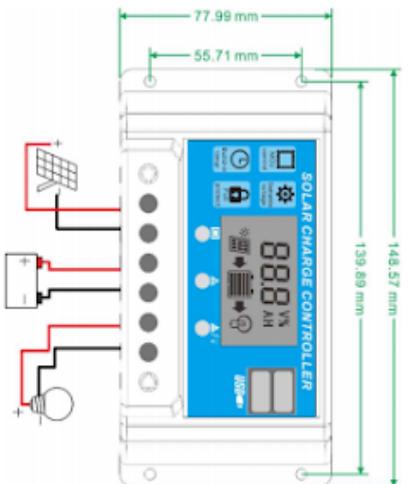
UP : pressionar para aumentar um valor.

DOWN : pressionar para diminuir um valor.

CONEXÃO DO SISTEMA

- 1º Passo - Conecte a bateria ao controlador de cargas (+) POS e (-) NEG.
- 2º Passo - Conecte o módulo PV ao regulador de cargas (+) POS e (-) NEG.
- 3º Passo - Conecte al(s) carga(s) ao controlador (+) POS e (-) NEG.

A ordem Inversa deve ser aplicada quando desinstalando o sistema! Ligar em sequência diferente da acima pode danificar o controlador!



MOSTRADOR/CONFIGURAÇÕES



ATENÇÃO:

1. Pressione o botão **[down]** para **LIGAR / DESLIGAR** a carga manualmente na tela principal.
2. Os modos de trabalho funcionam da seguinte forma:
 - [24H]** carga ligada 24 horas
 - [1-23H]** carga ligada no por do sol e desligada após N° de horas configuradas
 - [0H]** carga ligada do amanhecer ao anoitecer

SOLUÇÃO DE PROBLEMAS

Situação	Possível causa	Solução
Ícone carregamento apagado mesmo com sol	Painel Solar em circuito aberto ou polaridade invertida	Reconectar
Ícone da carga desligado	Ajuste errado	Configurar de novo
Ícone da carga piscando	Bateria baixa	recarregar
Ícone da carga piscando	Sobrecarga	Reduz potência da carga
Ícone da carga piscando	Proteção auto circuito	Ajuda reconectar
Destilando	Bateria muito baixopol invertida	Chocar bateria / conectar

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

MODELO	RBL-10A	RBL-20A	RBL-30A
Tensão da bateria	12V/24V auto		
Corrente de carga	10A	20A	30A
Corrente de descarga	10A	20A	30A
Tensão máxima entrada	<50V		
Tipo de bateria	B01 selada	B02 Gel	B03 inundada
	14.4V	14.2V	14.6V
	13.7V(padrão, configurar)vel		
Tensão de flutuação	10.7V(padrão, configurar)vel		
Desligar descarregada	12.6V(padrão, configurar)vel		
Reconectar descarregada	3V/3A		
Saída USB	<10mA		
Consumo próprio	-35~+60 °C		
Temperatura de operação	150*78-35mm /150g		
Dimensões / Peso			

*Todas Tensões em vermelho x2 quando usando sistemas 24V.

*Especificações do produto sujeitas a alteração em aviso prévio.