

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESPECIALIZAÇÃO EM FONTES RENOVÁVEIS:
GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO**

Adriana Mara de Carvalho Cunha

**ASPECTOS DE ENERGIA E POTÊNCIA VINCULADOS A UM SISTEMA DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ATRAVÉS DE BATERIAS OPERANDO EM
CONJUNTO COM UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE
ELÉTRICA**

Belo Horizonte

2021

Adriana Mara de Carvalho Cunha

**ASPECTOS DE ENERGIA E POTÊNCIA VINCULADOS A UM SISTEMA DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ATRAVÉS DE BATERIAS OPERANDO EM
CONJUNTO COM UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE
ELÉTRICA**

Versão final

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Fontes Renováveis: Geração, Operação e Integração como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Especialista em Fontes Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura

Belo Horizonte

2021



ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DA ALUNA ADRIANA MARA DE CARVALHO CUNHA

Realizou-se, no dia 06 de novembro de 2020, às 08:00 horas, em ambiente a distância (skype), da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *ASPECTOS DE ENERGIA E POTÊNCIA VINCULADOS A UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ATRAVÉS DE BATERIAS OPERANDO EM CONJUNTO COM UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA*, apresentada por ADRIANA MARA DE CARVALHO CUNHA, número de registro 2018745543, graduada no curso de ENGENHARIA ELÉTRICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em FONTES RENOVÁVEIS - GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Wallace do Couto Boaventura - Orientador (UFMG), Prof(a). Luiz G. Monteiro de Oliveira (PUC-MG).

A Comissão considerou a monografia:

(X) Aprovada

() Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 06 de novembro de 2020.

Prof(a). Wallace do Couto Boaventura (Doutor)

Prof(a). Luís Guilherme Monteiro de Oliveira (Doutor)

Fátima de Carvalho
Secretaria do Curso de Especialização em
Fontes Renováveis - Geração, Operação
e Integração

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu pai Luiz e minha mãe Aparecida, pelo amor e apoio incondicional em todas as minhas escolhas.

Ao professor e orientador Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura por compartilhar seu conhecimento e pelo suporte durante a produção deste trabalho.

Agradeço a Samuel pelo companheirismo e apoio em tudo o que esteve fora de meu alcance.

Agradeço a todos os outros professores pela dedicação no decorrer do curso, por proporcionarem o melhor de seus conhecimentos a toda à turma.

Aos colegas e amigos da especialização, pelos ótimos momentos compartilhados e pelos surreais.

RESUMO

Diante da diversificação da matriz energética através de fontes renováveis de energia, muitas oportunidades surgem para compor esse cenário visando o melhor aproveitamento da geração de energia limpa e agregar novas funcionalidades ao sistema. A utilização da irradiação solar através de módulos fotovoltaicos tem sido uma das soluções buscadas para geração tendo em vista que é uma fonte imune ao risco de desabastecimento devido a sua abundância. Apesar dos benefícios que um sistema fotovoltaico proporciona, ainda busca-se um cenário mais independente, no qual não só o consumidor possa produzir sua própria energia, mas, também, armazenar para utilizar em horários de pico e até mesmo fornecer serviços ancilares para favorecer o desempenho da rede elétrica, o que pode ser obtido pela agregação de um sistema de armazenamento de energia por baterias.

Estes sistemas podem facilitar a maior integração da geração de energia renovável, como comprovado em diversos países, por gerar vários benefícios para a rede elétrica, além de proporcionar independência energética ao consumidor. Com base neste cenário, este trabalho visa uma modelagem de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica com um sistema de armazenamento por baterias, bem como apresentar os benefícios desta interação. É apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema, versando sobre os benefícios que um sistema de armazenamento de energia através de baterias pode proporcionar notadamente aqueles baseados em baterias de íons de lítio.

Palavras-chave: sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica; sistema de armazenamento de energia em baterias; serviços ancilares; modelagem e simulações computacionais; PVSyst.

ABSTRACT

In view of the diversification of the energy matrix through renewable energy sources, many opportunities arise to compose this scenario, aiming at the better use of clean energy generation and adding new functionalities to the system. The use of solar irradiation through photovoltaic modules has been one of the solutions sought for generation considering that it is a source immune to the risk of shortages due to its abundance. Despite the benefits that a photovoltaic system provides, we are still looking for a more independent scenario, in which not only the consumer can produce his own energy, but also store it for use during peak hours and even provide ancillary services to favor power grid performance, which can be obtained by adding a battery energy storage system.

These systems can facilitate the greater integration of renewable energy generation, as proven in several countries, by generating several benefits for the electricity grid, in addition to providing energy independence to the consumer. Based on this scenario, this work aims at modeling photovoltaic systems connected to the electrical network with a battery storage system, as well as presenting the benefits of this interaction. A review on the topic is presented, focusing on the benefits that a battery energy storage system can provide, notably those based on lithium ion batteries.

Keywords: photovoltaic systems connected to the electrical network; battery energy storage system; ancillary services; computational modeling and simulations; PVSyst.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Classificação dos Tipos de Tecnologias de Armazenamento de Energia.....	17
Figura 2- Exemplos de curvas de descarga para diferentes tecnologias de baterias, mostrando a variação da tensão em função da capacidade de descarga.....	23
Figura 3-Influência da eficiência coulômbica na capacidade disponível durante a ciclagem.....	24
Figura 4- Diagrama da usina fotovoltaica conectada à rede elétrica.....	25
Figura 5 - Curva de carga do consumo residencial médio no Brasil e do potencial de geração distribuída solar.....	27
Figura 6 - Dados meteorológicos: média mensal para a cidade de Ribeirão das Neves no ano de 2017.....	28
Figura 7 – Parâmetros dos módulos fotovoltaicos Canadian Solar.....	31
Figura 8 – Curva I-V de variação da irradiância e curva I-V variação de temperatura de célula.....	31
Figura 9– Potência gerada de acordo com a irradiância solar.....	32
Figura 10 - Datasheet SolarEdge modelo SE8K- RWS.....	33
Figura 11– Pontos de máxima potência em tensões distintas.....	34
Figura 12- Diagrama do modo de carga diária das baterias.....	36
Figura 13- Diagrama do modo de descarga diária das baterias.....	37
Figura 14- Diagrama de modo direto de geração de energia.....	37
Figura 15- Diagrama de fornecimento sem armazenamento e com auxílio da rede.....	38
Figura 16- Diagrama de consumo noturno.....	38
Figura 17- Diagrama de Perdas Anual.....	40
Figura 18– Índice de Desempenho Mensal com Sistema de Armazenamento de Energia.....	42
Figura 19 – Produção normalizada de energia útil com sistema de armazenamento.....	43
Figura 20 - Produção normalizada de energia útil sem o sistema de armazenamento.....	44
Figura 21 - Índice de Performance Mensal Sem Armazenamento de Energia.....	44
Figura 22 - Diagrama de Perdas Anual Sem Armazenamento.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Levantamento do consumo diário	26
Tabela 2 - Parâmetros dos módulos fotovoltaicos.....	30
Tabela 3 – Configuração do sistema de armazenamento de energia em baterias.....	35
Tabela 4- Principais resultados da simulação do sistema de armazenamento.....	41

LISTA DE SIGLAS

CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
COP15	COP15
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
Esolar	Energia fornecida ao usuário pela fonte solar
Eusuário	Energia necessária ao usuário
FV	Fotovoltaica
GD	Geração distribuída
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LABREN	Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia
GD	Geração distribuída
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ONU	Organização das Nações Unidas
PR	Índice de performance (do inglês <i>Performance Ratio</i>)
PV _{sys}	Photovoltaic Systems Software
SAEB	Sistema de armazenamento de energia através de baterias
SPMP	Seguimento do ponto de máxima potência
V _{mpp}	Valores de máximo ponto de potência
SAEB	Sistema de armazenamento de energia através de baterias
YF	Produção do sistema normalizada
YR	Energia incidente no plano do coletor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Objetivo geral	12
1.1.1	Objetivos específicos.....	13
1.2	Metodologia.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	Características de um sistema de armazenamento	15
2.2	Aplicações de sistemas de armazenamento em sistemas de distribuições.....	18
2.3	Baterias ou acumuladores de energia.....	20
2.3.1	Tecnologia baterias de Íons De Lítio.....	20
2.3.2	Ciclo de Vida das Baterias.....	21
2.3.3	Estado de Carga	22
2.3.4	Profundidade de Descarga	23
3	PRÉ-PROJETO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	25
3.1	Perfil de Consumo Diário de Energia	26
3.2	Orientação e Localização.....	27
3.3	Conjunto de Módulos Fotovoltaicos.....	30
3.4	Inversor de frequência	32
3.5	Sistema com Armazenamento de Energia através Baterias - SAEB.....	34
3.6	Descritivo do Modo de Consumo	35
3.7	Perdas e Eficiências Energéticas do Sistema.....	39
3.8	Sistema Fotovoltaico sem Armazenamento.....	43
4	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	46
4.1	Vantagem do Sistema Fotovoltaico com e sem Armazenamento.....	46
4.1.1	Com armazenamento	46
4.1.2	Sem armazenamento.....	47
4.2	Desvantagem do Sistema Fotovoltaico com e sem Armazenamento	47
4.2.1	Com armazenamento	47
4.2.2	Sem armazenamento.....	48

5	CONCLUSÃO.....	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1 INTRODUÇÃO

As possíveis variações climáticas causadas pela ação do homem, em virtude da exploração dos recursos naturais durante anos, passam a ser uma preocupação global em vista da escassez de recursos naturais, possíveis aumentos das temperaturas climáticas, os quais podem afetar a qualidade de vida das pessoas e dos animais, com ameaça de extinção de espécies.

Esta crescente preocupação mundial é consequência do modo de produção e consumo que vigora por muitas gerações.

Com o objetivo de estabelecer metas para que os países reduzam sua emissão de gases poluentes, vários países do mundo se dedicam ao debate sobre a questão ambiental como COP15, a Rio+20 entre outras conferências buscando criar mecanismos e propôs ações de mitigação aos impactos ambientais.

Um desafio que precisa englobar soluções de produção de energia limpas juntamente com o aumento da geração de energia em vistas a uma demanda de energia cada vez maior, num mundo em que o acesso à tecnologia, permitido pela disponibilidade de energia, passa a ser um recurso indispensável em muitos os aspectos de vida como na saúde, lazer e no trabalho.

Considerando que as fontes de energia renováveis vêm incorporando a matriz energética brasileira e que programas que estimulam sua produção foram implementados ao longo das últimas décadas, este trabalho apresenta um projeto de geração de energia limpa através de uma micro geração somado a um Sistema de Armazenamento de Energia através de Baterias (SAEB). O intuito é demonstrar a viabilidade energética proporcionada e benefícios ao consumidor, assim como salientar as vantagens que o sistema de armazenamento pode oferecer ao aliviar os elevados níveis de penetração da Geração Distribuída (GD) na rede de distribuição.

1.1 Objetivo geral

Este trabalho pretende apresentar às vantagens de um projeto geração de energia conectada a rede elétrica associado a um sistema de armazenamento através de baterias de lítio, salientando não

somente a solução energética para o consumidor, mas também as vantagens de possibilitar prestar serviços á rede de distribuição.

1.1.1 Objetivos específicos

- Apresentar as características de um sistema de armazenamento de energia, suas vantagens e aplicações, conjugada a um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica;
- Apresentar as vantagens e desvantagens da tecnologia de baterias de lítio-íon;
- Modelar, simular e analisar os resultados de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica acoplado a um sistema de armazenamento de energia através do software *PVsyst versão 7.1*, (*Photovoltaic Systems Software*).

1.2 Metodologia

Para realização deste trabalho foi desenvolvido um projeto no software *PVsyst* contendo um sistema de geração de energia através de módulos fotovoltaicos e associados a um sistema de armazenamento de energia através de baterias de lítio. A partir do projeto são avaliados os resultados em vistas dos benefícios da associação de um sistema fotovoltaico a um sistema de armazenamento para o consumidor e para a rede elétrica, assim como suas desvantagens.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente, a busca por uma matriz energética diversificada é um grande desafio para todos os países. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU, 2020), um dos maiores desafios do nosso tempo são os impactos que as mudanças climáticas proporcionam afetando desde a produção de alimentos até o aumento do nível do mar que ampliam os riscos de inundações, tais impactos desestabilizam a sociedade e o meio ambiente em proporções ainda não presenciadas pela humanidade.

Segundo Yasar Demirel (2016), a energia é um dos principais estimuladores de desenvolvimento e essa demanda cresce rapidamente, enquanto a extração de combustíveis fósseis se torna cada vez mais difícil, custosa e ambientalmente insustentável.

A busca por sustentabilidade é uma das formas de explorar a natureza sem exceder seus limites de renovação natural. Sendo assim, a gestão da energia se torna um desafio que envolve a sustentabilidade dos recursos naturais, o desenvolvimento de soluções energéticas limpas, o provimento do aumento da geração de energia, cujo consumo se apresenta com recorrente crescimento.

Para a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019), o desafio energético abre espaço para tecnologias de armazenamento que poderão prestar serviços ao Sistema Interligado Nacional, atuando no aumento de recurso para suprir a demanda e fornecendo modernização ao setor elétrico. Além de apresentar exponencial aumento de instalações de baterias em sistemas elétricos, principalmente as de íons de lítio, também apresentam projeções de redução de custo e crescimento para as próximas décadas.

De acordo com A.G. Ter-Gazarian (2011), a demanda de uma concessionária de energia é caracterizada por variações horárias, diárias e sazonais, enquanto as capacidades instaladas do lado da oferta são fixas. Na busca por minimizar os custos na variação da demanda, garantindo também à sua confiabilidade, as concessionárias tentam coincidir os recursos de geração com as características de carga. Para a tomada de decisões e planejamento, o efeito da introdução de uma unidade armazenadora de energia garante uma otimização do sistema, uma vez que: melhora o

efeito da flutuação de carga do sistema, atua no controle com cortes de pico de energia. (DIVYA; OSTERGAARD, 2009) afirmam que os sistemas de armazenamento de energia são a chave para maior inserção de fontes renováveis.

É importante salientar que a avaliação econômica de baterias de lítio para um sistema de armazenamento ainda representa custos elevados assim como para veículos elétricos, as quais se apresentam como um grande desafio tecnológico a ser superado. (SILVA, 2019).

Em meio às diversas possibilidades de armazenamento de energia, segundo a EPE (2019) para a prestação e tais serviços as baterias apresentam com grande potencial e a viabilidade das mesmas sobressai quando associadas a outras aplicações.

Conforme Moseley et al. (2015), a inclusão de um sistema de armazenamento de energia implementado em conjunto com um sistema de geração renovável, pode apresentar várias soluções dependendo da demanda, do perfil e dos recursos que compõe a rede elétrica. A título de exemplo, é citada a diferença de demanda energética do estado da Califórnia nos Estados Unidos da América (EUA) em relação ao perfil de demanda da Dinamarca. O primeiro possui alta demanda de ar-condicionado e elevados níveis de penetração de energia solar fotovoltaica já o segundo, é um país que depende da energia eólica e tem maior demanda por aquecimento elétrico. Existem arranjos para equilíbrio da rede em ambos os casos através de contratos de regulação de frequência, entretanto um sistema de armazenamento interconectado com outros sistemas pode realizar a função de regulação de frequência, é ser capaz de absorver energia ao lidar com a sobrefrequência reduzindo assim um risco amplo de falha ao sistema além de expandir a competição de mercados de reserva.

2.1 Características de um sistema de armazenamento

Os sistemas de armazenamento estão entre as tecnologias mais relevantes do século XXI.

Esta importante evolução é uma das soluções para promover a transição do uso de combustíveis fósseis para fontes de energias renováveis, mais limpas. A utilização de baterias apresenta uma solução promissora para o armazenamento energia em larga escala para todos os tipos de consumidores, sejam os residenciais, os comerciais e até os industriais.

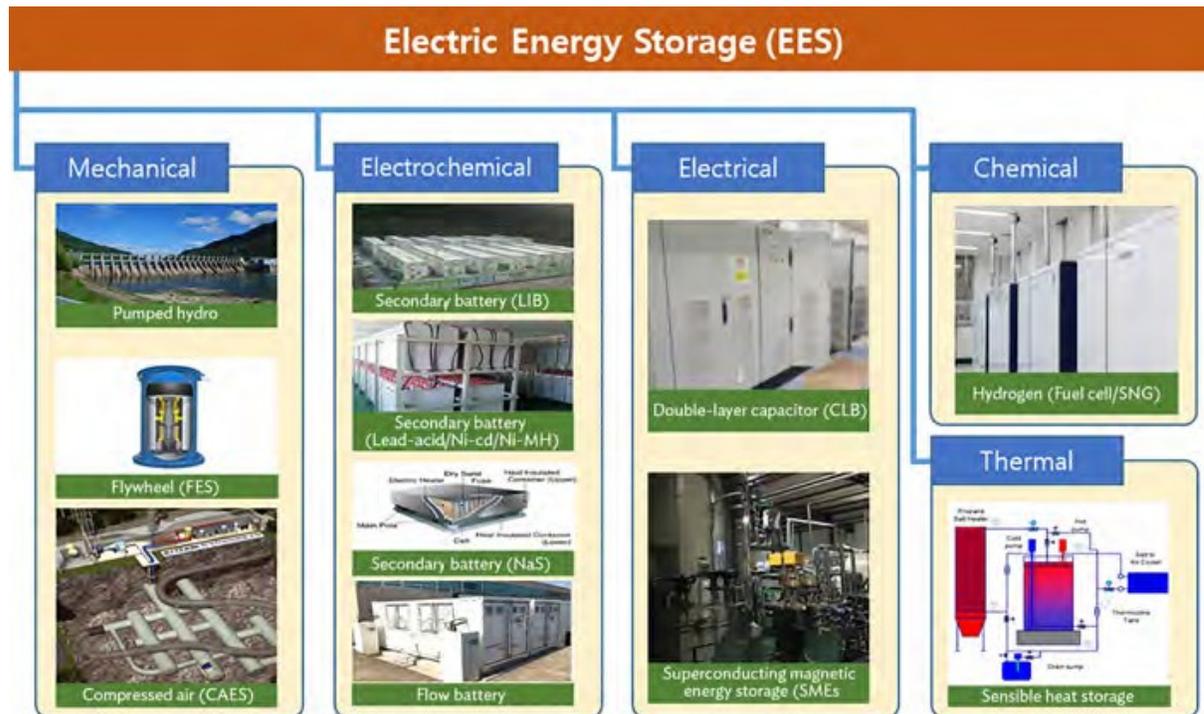
De acordo com Mitavachan et al., (2015), devido à capacidade do sistema de armazenamento dissociar a demanda da oferta, a Alemanha obteve resultados para enfrentar os problemas causados pela inserção massiva de energias renováveis em sua rede elétrica ocorrendo excesso de fluxo reverso de energia, altas magnitudes de tensão local, com possível violação de tensão em horário de pico da geração de energia solar fotovoltaica. Essas questões podem induzir instabilidade na rede elétrica, além de limitar maior penetração de energias renováveis devido a sua natureza intermitente e não determinística.

As tecnologias de armazenamento são as mais diversas e muitos fatores devem ser levados em consideração em sua escolha, a qual desempenhará melhor resultado, pois envolve aspectos determinantes como a vida útil, a densidade de energia, a eficiência potência de saída, duração da descarga e seu custo.

Segundo ADB (2018), os tipos de armazenamento apresentados na Figura 1 e são classificados como:

- Mecânicos – tecnologia que inclui a geração de hidrelétricas bombeadas, sendo esta a tecnologia mais antiga, limitada à disponibilidade de recursos hídricos abundantes e de elevada diferença geográfica (desnível). Outra tecnologia mecânica de armazenamento de energia é conhecida como volante de inércia na qual a energia excedente é armazenada em um volante em forma de disco de alta velocidade e rotação, esta energia cinética pode ser usada posteriormente para acionar um gerador e produzir energia elétrica, (AHMAD, 2021). O armazenamento de energia através de ar comprimido é mais uma tecnologia mecânica que pode ocorrer em cavernas ou em dutos de aço acima do solo com base nos ciclos termodinâmicos como adiabáticos e isotérmicos, (MOSELEY et al., 2015).

Figura 1- Classificação dos Tipos de Tecnologias de Armazenamento de Energia.



Fonte: Handbook on Battery Energy Storage System, 2018.

- Químicas – De acordo com Benoit Robyns et al. (2015), os sistemas de armazenamento de energia de hidrogênio usam um eletrolisador. Durante os períodos de armazenamento de eletricidade, o eletrolisador divide a água em oxigênio e hidrogênio de acordo com a equação $2H_2O = 2H_2 + O_2$. Este gás é então armazenado na forma líquida, comprimida ou sólida; no último caso pela formação de compostos químicos, geralmente hidretos metálicos. O armazenamento de hidrogênio é interessante, pois tem uma densidade de energia muito alta e pode ser usado para armazenar grandes quantidades de energia. No entanto, atualmente sofre de várias desvantagens; uma baixa eficiência do processo, que é cerca de 30% na melhor das hipóteses; alto custo; poder limitado; baixa vida útil dos componentes eletroquímicos; e, finalmente, o fato de que o hidrogênio apresenta problemas de segurança específicos.
- Elétricas – Para Huggins (2010), a energia pode ser armazenada reversivelmente em campos elétricos através de capacitores. Estes fornecem a energia de forma rápida e eficiente assim como obtêm curtos períodos de recarga. E ainda, apresenta uma característica interessante,

pois, a quantidade de energia armazenada em um capacitor é inversamente proporcional ao volume do material dielétrico entre as placas do capacitor.

- Térmicas – Segundo Moseley et al. (2015), uma das formas de se obter energia térmica é através do armazenamento em um tanque bem isolado e a água quente é retirada no final do dia ou da semana, em vez de a água ser aquecida sob demanda. Desta fornece uma maneira de custo muito baixo para um fornecedor de eletricidade para ser capaz de modular a produção de recursos renováveis para corresponder à demanda. A diferença significativa entre essa forma de armazenamento e as baterias de escala doméstica é que nessa a energia armazenada não pode ser recuperada como eletricidade.
- Eletroquímicas – Segundo Benoit et al. (2015), os bancos acumuladores eletroquímicos ou baterias, fornece energia elétrica para um circuito externo na forma de baixa tensão corrente contínua, transformando progressivamente seus elementos químicos internos após a reação de oxidação/ redução dos eletrodos. Ao final da transformação (descarga) a energia é esvaziada e pode ser recarregada via reações eletroquímicas.

De acordo com Yasar Demirel (2016), a primeira bateria foi inventada por Alexandre Volta em 1800, e poder ser composta por uma ou mais células eletroquímicas que podem armazenar energia na forma de energia química, bem como converter energia química armazenada em energia elétrica.

Os tipos de baterias mais usuais são os seguintes: baterias primárias, que são descartáveis e projetadas para serem usadas uma vez e as baterias secundárias que possuem capacidade de reações reversíveis eletroquímicas possibilitando serem carregadas e descarregadas por diversas vezes, as quais são utilizadas em sistemas de armazenamento de energia elétrica.

2.2 Aplicações de sistemas de armazenamento em sistemas de distribuições

Múltiplas são as aplicações de baterias no sistema de distribuição. Dentre estas podemos destacar:

- ***Peak Shaving***

De acordo com Holger et al. (2017), as violações dos níveis mínimos de tensão ocorrem em momentos de alta demanda de carga. O sistema de armazenamento de energia atua suavizando o sistema elétrico e reduzindo o estresse da rede elétrica a qual o sistema está acoplado. Este tipo de serviço reduz tanto custos de expansão do sistema elétrico quanto a melhoria de redes elétricas já existentes. Como podem ser instalados em diversos pontos da rede elétrica, é uma medida utilizada, de forma temporária, para aliviar o sistema elétrico.

- **Suporte de Tensão**

Segundo Costa e Silva et al. (2016), para manter os níveis de tensão estáveis no sistema de transmissão ou distribuição dentro dos limites estabelecidos em normas técnicas / regulamentações, este tipo de ação realiza o suporte de tensão através da injeção ou absorção de potência reativa, proporcionando assim, o controle e estabilidade do sistema elétrico.

- **Compensação de Reativos**

Segundo Santos K.P. et al. (2009), a variação dos níveis de tensão é ocasionada pela alteração da carga conectada a rede elétrica, isto ocorre porque uma variação da potência reativa da carga irá levar ao aumento ou redução da corrente elétrica que circula pela rede, provocando, assim, a alteração dos níveis de tensão. Através do armazenamento de energia é possível realizar a compensação de reativos, a qual garante o equilíbrio dos níveis de potência reativa e, desta forma, a estabilidade dos níveis de tensão.

- **Microrredes**

De acordo com Abbas et al. (2013), uma microrrede é um sistema ilhado ou paralelo à rede elétrica que contém várias cargas e recursos energéticos distribuídos, apresentando uma integração entre diversas fontes de energias renováveis. O sistema de armazenamento de energia em uma microrrede promove serviços ancilares bem como a melhoria da qualidade de energia do sistema.

- **Regulação de Frequência**

Segundo ADB (2018), a rede elétrica possui uma frequência nominal (50 ou 60 Hz). A regulação desta frequência consiste no ajuste constante de energia por segundo para garantir a estabilidade da rede elétrica. Com o aumento ou diminuição da demanda, a frequência pode aumentar ou diminuir e isso aumenta a possibilidade de danificar dispositivos eletrônicos. O armazenamento

de energia pode fornecer esta variação de energia demandada com tempo de resposta menor que um segundo, regulando a frequência de forma adequada.

2.3 Baterias ou acumuladores de energia

Segundo ADB (2018), as baterias de lítio-íon são da família das tecnologias eletroquímicas classificadas como secundárias e convertem energia elétrica para energia química e vice-versa. Possuem maior vida útil e por isso, cada vez mais os fabricantes de dispositivos eletrônicos tem aderido a essa tecnologia, além de apresentar melhor eficiência na aplicação com sistemas que utilizam recursos naturais (ex: solar e eólica).

É importante se ater as particularidades da aplicação, pois o armazenamento por vez é diferenciado com base na densidade de energia, a eficiência de carga e descarga, vida útil, os custos e a compatibilidade ecológica do dispositivo. Um dimensionamento assertivo do banco de baterias recorre em evitar a degradação crítica da bateria, permitindo, assim, usufruir ao máximo do benefício disponibilizado pelo dispositivo.

2.3.1 Tecnologia baterias de Íons De Lítio

As baterias de íons de lítio apresentam uma das tecnologias com melhor desempenho de armazenamento e prolongada vida útil em relação a outras tecnologias de baterias.

Para ADB (2018), as baterias secundárias de íons de lítio armazenam de 150 a 200 watts por quilograma e comportam de 1,5 a 2 vezes mais energia do que baterias de sódio-enxofre; duas a três vezes mais energia do que as baterias de fluxo redox; e cerca de cinco vezes mais do que as baterias de chumbo ácido. As baterias secundárias de íons de lítio têm a mais alta eficiência de carga e descarga, 95%, enquanto as baterias de chumbo-ácido apresentam acerca de 60 a 70% e as baterias de fluxo redox com aproximadamente 70 a 75% de eficiência.

Segundo E. O. Ogunniyi et al. (2017), a necessidade de um sistema com maior densidade de energia do que as baterias de chumbo-ácido, com custo mais razoável do que os fornecidos pelo mercúrio, prata ou sistemas alcalinos de dióxido de manganês, impulsionou as baterias de lítio-íon eletrolítico orgânico com densidade de energia de até 330Wh/kg, quase três vezes maior do que as citadas acima (este valor tem crescido de continuamente devido à evolução da tecnologia).

Apesar de ainda ser uma tecnologia que apresenta custo significativo e ainda ser necessário um sistema de segurança contra sobrecarga, proteção contra altas temperaturas, as quais aceleram o envelhecimento e necessitam de controladores e cargas sofisticados, ainda é uma das tecnologias eletroquímicas mais promissoras. Elas apresentam elevadas densidades energéticas, reduzida manutenção, alto desempenho, suportam altas taxas de carga/descarga e descarga profunda com vida cíclica de vários anos. Combinações de outros elementos associados ao lítio permitem aplicações em veículos automotivos (elétricos), aeroespacial e eletrônicos. (GALDINO et al. (2018).

2.3.2 Ciclo de Vida das Baterias

Toda bateria tem um tempo de funcionamento, o que chamamos de vida útil. Este parâmetro é determinado durante o processo de fabricação na fase de teste no qual a bateria é submetida.

De acordo com Yuping Wu (2015), uma bateria de íons de lítio é armazenada por algum tempo a uma temperatura ambiente de 25° C e depois totalmente carregada. Feito isso, a bateria é descarregada na tensão regulada do terminal (geralmente 3V) a uma taxa específica em sala com condicionamento de temperatura (geralmente 0,2° C). Após isto a bateria é ciclada (carregada e descarregada) repetidamente como nos processos anteriores descritos. O intervalo entre duas sucessivas cargas e descarga não deve ser maior do que algumas horas. Quando a capacidade diminui para um valor especificado (geralmente 80% da capacidade nominal), é obtido o número de ciclos o qual determina a vida útil da bateria de íons lítio.

O ciclo de vida é o número de vezes que uma bateria recarregável pode ser ciclada (carregada e descarregada), antes de perder significativamente sua capacidade de carga.

O processo que ocorre na bateria não é completamente reversível quimicamente. Depois de repetidas cargas/descargas a bateria reduz sua capacidade até chegar a uma carga menor que o limite mínimo de 80% da capacidade nominal, na qual se encerra a disponibilidade do dispositivo.

Segundo Yuping Wu (2015), além da perda pela utilização gradual, algumas ocorrências podem reduzir a vida útil da bateria como excesso de descarga (*overdischarge*), que consiste no efeito de descarga abaixo do limite de descarga permitido. Este processo promove a dissolução do cobre que produzirá rachaduras no material elevando assim sua resistência, e assim, provocará a

separação dos materiais do eletrodo negativo do coletor de corrente, resultando na redução da vida útil da bateria. Outro comportamento não desejável é a auto descarga (*self-discharge*), que é um fenômeno no qual reações colaterais químicas reduzem a capacidade de armazenamento da bateria sem conexão entre os eletrodos. Além de sobrecargas (*overcharge*), que resultará em problemas de segurança. Por exemplo, quando as células ligadas em paralelo estão carregadas, as células com a resistência mais baixa receberão uma corrente maior e será totalmente carregado primeiro. O carregamento, contínuo levará a uma situação de sobrecarga.

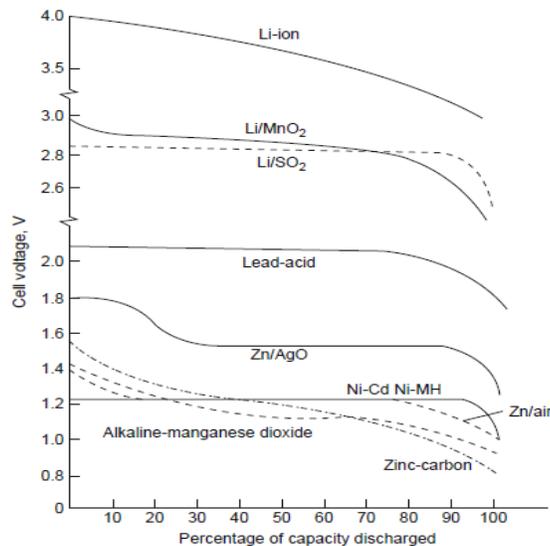
2.3.3 Estado de Carga

Para Huggins (2010), o sistema de funcionamento de uma bateria opera em relação à tensão que é um importante parâmetro tanto durante a descarga que fornece energia elétrica e potência, quanto durante o processo de recarregar a bateria, o qual reserva energia. Num circuito aberto a tensão da célula é determinada, principalmente, pela reação química entre os componentes nos eletrodos, este fornece a força motriz para o transporte de íons através de eletrólito e elétrons através do circuito externo. A energia contida em um sistema eletroquímico é parte integrante da tensão multiplicada pela capacidade de carga, a qual pode variar o estado de carga assim como parâmetros cinéticos.

Ainda para Huggins (2010), o estado de carga é a quantidade de energia da bateria disponível para uso em relação à sua capacidade máxima. Logo, é determinante conhecer a quantidade de carga que teoricamente poder ser armazenada, assim como sua capacidade máxima. Por isso, é importante é relacionar as curvas de carga e descarga nas quais é considerada a relação entre a tensão da célula e o estado de carga sob condições de equilíbrio ou quase-equilíbrio. A tensão na maioria das células eletroquímicas varia conforme a energia química é excluída, ou seja, quando a bateria é descarregada. Da mesma forma, ocorre quando a energia muda de direção para que a bateria seja recarregada. Esta mudança ocorre não apenas nas faixas de tensão, mas também com as características eletroquímicas dos componentes de uma bateria. As mudanças, em termos de curvas de carga e descarga, demonstram a relação da tensão em função do estado de carregamento da bateria, podendo variar muito dependendo da taxa de energia que é extraída ou adicionada à célula. Considerar a relação entre tensão da célula e estado de carga é útil é uma forma de obter informações das condições de equilíbrio e quase-desequilíbrio. Na Figura 2, é

mostrada uma comparação entre tensão da célula em função da capacidade de descarga de diferentes tipos de baterias. Em muitas aplicações espera-se que sejam mantidas as propriedades principais ao longo de muitos ciclos de carga e descarga.

Figura 2- Exemplos de curvas de descarga para diferentes tecnologias de baterias, mostrando a variação da tensão em função da capacidade de descarga.



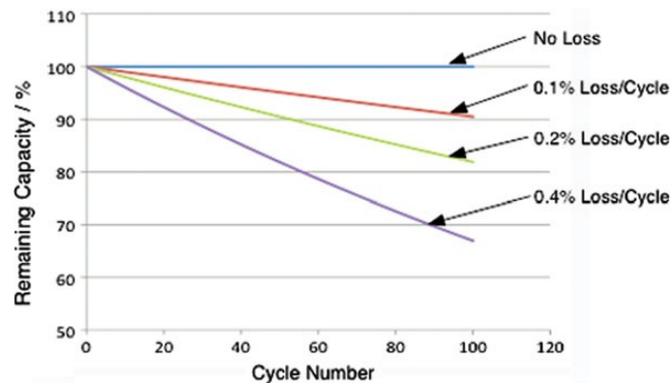
Fonte: Energy Storage, 2010.

É observado que ocorrem diferenças significativas nos comportamentos das curvas de descarga, entretanto, sistemas diferentes de baterias têm capacidades diferentes, desta maneira, é necessário cuidado para comparar essas tecnologias diferentes de armazenamento de energia.

2.3.4 Profundidade de Descarga

Para Huggins (2010), é esperado que as propriedades da bateria sejam mantidas por vários ciclos de descarga, entretanto, esse quesito depende de outros fatores, como a carga e descarga, profundidade de descarga e ciclo das baterias. Esta é definida no projeto de acordo com o tipo de bateria e as especificações do fabricante. A Figura 3 mostra o impacto de perdas das características das baterias por ciclo para três diferentes valores, em percentagem, na qual evidencia que quanto maior a quantidade de descargas profundas, maior a perda de vida útil da bateria.

Figura 3-Influência da eficiência coulômbica na capacidade disponível durante a ciclagem



Fonte: Energy Storage, 2010.

Observa-se na Figura 3 que para uma perda de 0,1% por ciclo, reduz-se a capacidade total disponível para 90% do valor original após 100 ciclos e para eficiências mais baixas a situação é ainda pior.

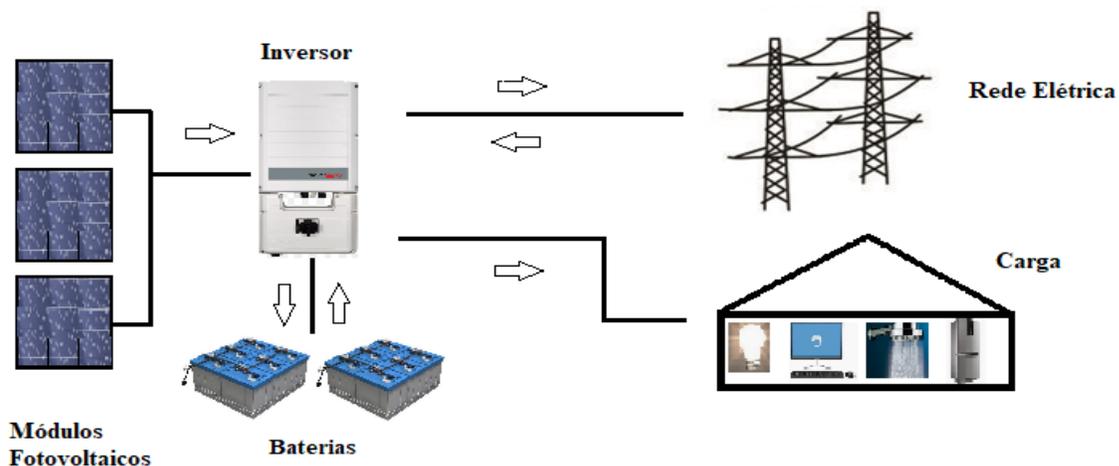
Para Yuping Wu (2015), a profundidade de descarga refere-se à porcentagem da capacidade da bateria que foi descarregada, a qual é expressa como uma porcentagem da capacidade máxima.

3 PRÉ-PROJETO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Objetivando demonstrar os benefícios de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica com um sistema de armazenamento de energia, este trabalho apresenta os resultados de simulações computacionais, utilizando o software *PVsys* versão 7.1, de um pré-projeto de uma micro geração distribuída fotovoltaica de capacidade instalada de 8 kW_p, acoplada a um sistema de armazenamento de energia utilizando um banco de baterias de lítio-íon com capacidade de 412 Ah, conforme apresentado na avaliação do software usado no projeto.

Nesse estudo é apresentado um sistema no qual é permitida a comunicação com a rede elétrica através de um inversor bidirecional e proposto uma análise da utilização da energia gerada de um sistema fotovoltaico com armazenamento de energia em condições na qual a rede elétrica não esteja disponível. Alguns lugares já adotaram esta configuração, como Califórnia, Dinamarca, segundo Patrick T. Moseley et al. Apesar do Brasil ainda não ter uma norma regulatória que permita a implantação deste tipo de configuração, juntamente com os seus múltiplos serviços, neste trabalho é apresentado uma simulação dessa configuração.

Figura 4- Diagrama da usina fotovoltaica conectada à rede elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora

Conforme Figura 4 apresenta, os módulos fotovoltaicos que produzem energia elétrica através da incidência solar sobre sua superfície (efeito fotovoltaico) e são conectados a um único inversor que tem a função de gerenciar a produção de energia fotovoltaica e carrega/descarga das baterias. As baterias armazenam a energia que será utilizada em horários de pico, de falta de geração do

sistema fotovoltaico ou falta na rede elétrica de energia. O inversor que é responsável pela gestão e controle do fluxo de potência do sistema, por ser bidirecional, admite a utilização da rede elétrica possibilitando gerar créditos para desconto na conta de energia, além de possuir a tecnologia de busca do seguimento do ponto de máxima potência, SPMP.

3.1 Perfil de Consumo Diário de Energia

Para implantação do sistema fotovoltaico proposto com armazenamento de energia são considerados alguns requisitos da residência.

A conexão da residência com a concessionária é da classe Trifásica Residencial e a estratificação do histórico do consumo foi realizada com base no período de um ano e as informações do perfil de consumo horário foram levantadas para possibilitar distinguir o período do dia de maior consumo de energia. Através do site da CEMIG, o qual disponibiliza uma ferramenta para estimar o consumo do cliente, foi obtido o levantamento do consumo diários apresentados na Tabela 1, onde é descrito a quantidade de eletrodomésticos juntamente com a potência relativa ao consumo horário e diário de cada aparelho e finalmente se obtém o valor total do consumo diário.

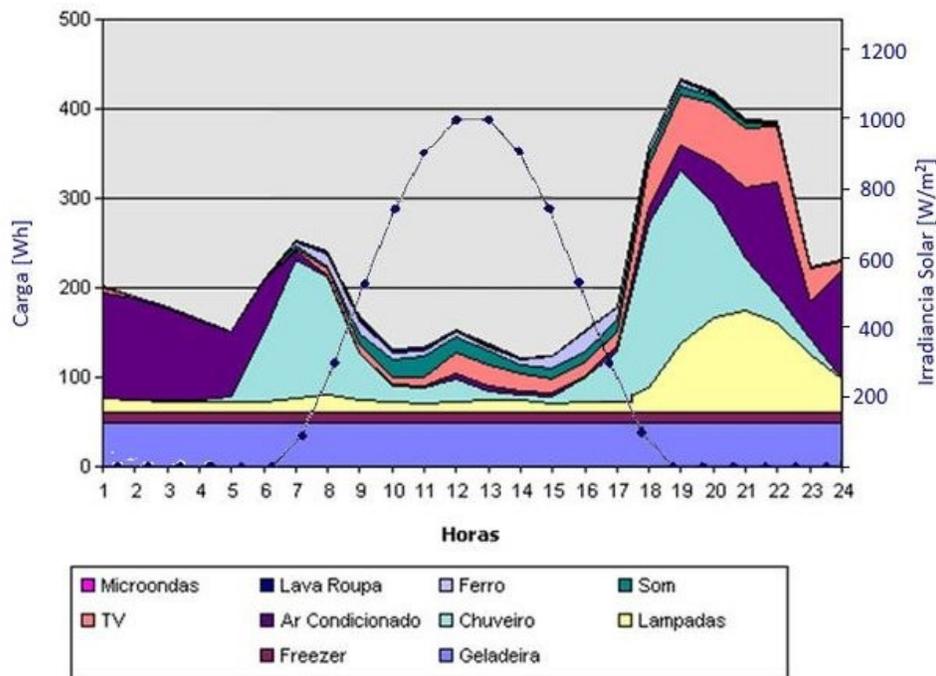
Tabela 1 - Levantamento do consumo diário

Equipamento	Quantidade	Potência (W)	Dias de Uso	Tempo de Uso (Hs)	Total
Ar-condicionado	1	2000	20	7h	280
Carreg. Celular	2	15	30	4h	3,6
Chuveiro	1	5500	30	1h45	288,75
Computador	1	200	20	2h	8
Ferro de Passar	1	1000	7	0h30	3,5
Forno Elétrico	1	1500	8	1h	12
Freezer	1	72000	30	8h	17280
Geladeira	1	42000	30	8h	10080
Lâmpadas 20 W	8	20	30	6h	28,8
Lavadora Roupa	1	1000	12	2h	24
Liquidificador	1	300	8	0h05	0,2
Microondas	1	1500	24	0h20	12
Secador Cabelo	1	1000	8	1h	8
Televisão	1	150	30	3h	13,5
Total (kW)			28,04235		

Fonte: Adaptado de Simulador de Consumo Cemig. <https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Documents/SimuladorDeConsumo/Cemig%20-%20Estime%20seu%20Consumo2.htm>

De acordo com a pesquisa Geração distribuída e eficiência energética: Reflexões para o setor elétrico de hoje e do futuro - 2018, uma curva de consumo residencial médio que engloba todas as regiões do Brasil, Figura 5, apresenta o perfil de consumo horário associado à variação de consumo de energia por aparelhos elétricos, a irradiação solar e a geração de energia fotovoltaica. Nela é evidenciado o pico de demanda de energia que se concentra de 17hs às 21hs e a geração de energia fotovoltaica, linha pontilhada, a qual tem seu pico de geração em horários distintos do pico de consumo de energia.

Figura 5 - Curva de carga do consumo residencial médio no Brasil e do potencial de geração distribuída solar.



Fonte: Geração distribuída e eficiência energética: Reflexões para o setor elétrico de hoje e do futuro, IEI 2018.

3.2 Orientação e Localização

A localidade usada como referência para estudos de viabilidade solar tem os parâmetros geográficos da cidade de Ribeirão das Neves -MG com latitude igual a -19,81 S, longitude de -44,03 W e altitude de 915 metros acima do nível do mar.

As informações sobre o histórico meteorológico foram estratificadas por meio de levantamento de dados do INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e do INMET Instituto Nacional de Meteorologia. Através de uma das divisões do INPE, o LABREN - Laboratório de Modelagem e

Estudos de Recursos Renováveis de Energia, que realiza a atividade de pesquisa na área meteorológica aplicadas ao setor de energia, foi possível obter os dados de irradiação do estado de Minas Gerais. Esses dados são mapeados por área através da identificação de cada célula por uma identidade ID. A ID deste trabalho é 11646 que mapeia, entre outras localidades, a cidade de Ribeirão das Neves – MG e assim obteve-se os dados de Irradiação Global Horizontal e Irradiação Difusa mensal referente a última medição que ocorreu em 2017.

Para as medições de Umidade Relativa do Ar e Velocidade do Vento, os dados foram extraídos do INMET, referente ao ano de 2017. Os dados mensais do ano referido foram obtidos através da unidade meteorológica A521 – Pampulha, a qual se localiza mais próxima das coordenadas este estudo.

Figura 6 - Dados meteorológicos: média mensal para a cidade de Ribeirão das Neves no ano de 2017.

Localização **Ribeirão das Neves - MG - BRASIL INPE/INMET (Brazil)**

Fonte dos dados **INPE INMET-2017- MG- BRASIL (Modified by user) (Modified by user) (Modified by user) (Modi**

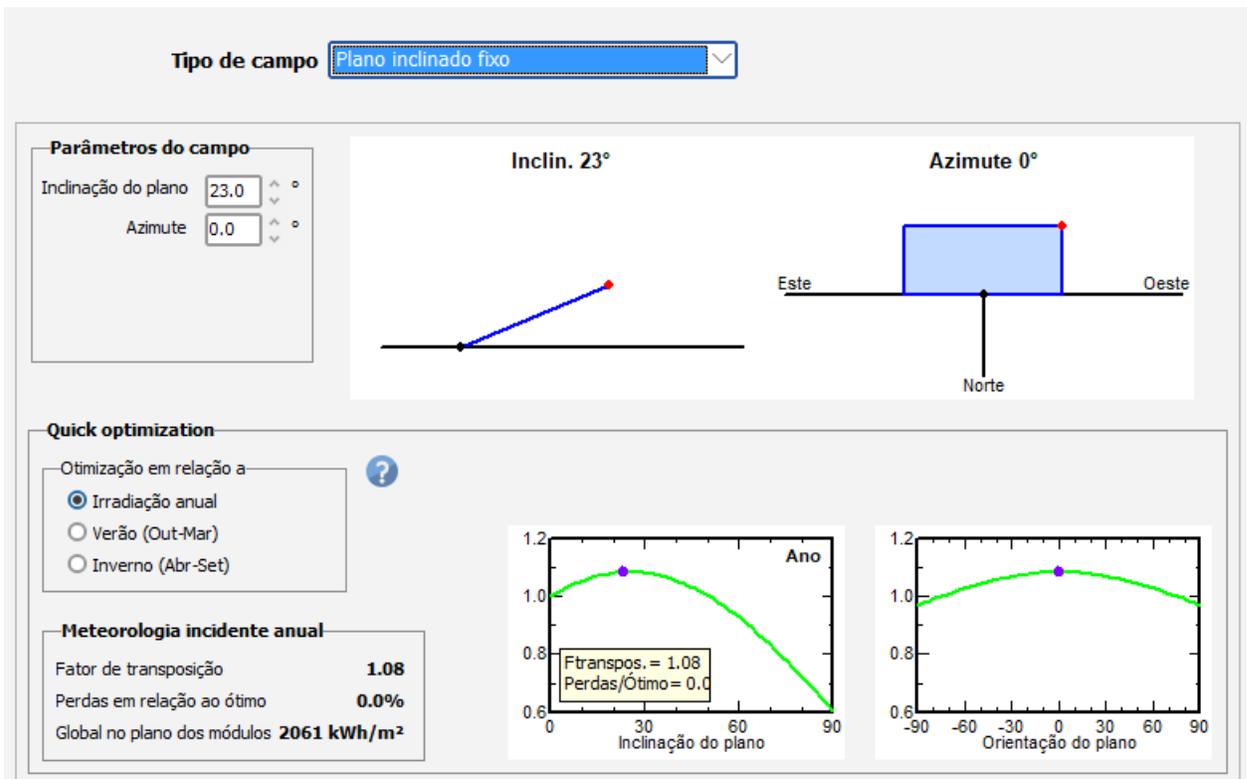
	Irradiação global horizontal kWh/m ² /mês	Irradiação difusa horizontal kWh/m ² /mês	Temperatura °C	Velocidade do vento m/s	Linke turbidity [-]	Relative humidity %
Janeiro	180.5	78.6	24.4	2.13	3.330	60.0
Fevereiro	169.2	66.5	22.9	2.12	3.285	69.4
Março	158.8	68.5	23.4	1.93	3.224	63.7
Abril	145.0	55.5	22.4	1.96	3.046	65.6
Mai	131.5	47.5	20.3	1.83	2.868	68.4
Junho	151.2	42.1	19.6	1.70	2.790	64.2
Julho	133.3	43.4	17.4	2.28	2.824	60.3
Agosto	160.2	49.5	20.3	2.44	3.109	51.2
Setembro	166.1	54.3	20.9	2.86	3.954	50.2
Outubro	174.5	69.9	23.8	2.63	3.840	53.9
Novembro	160.5	78.8	22.1	2.00	3.421	69.6
Dezembro	173.8	83.3	23.3	1.80	3.369	71.2
Ano ?	1904.6	737.9	21.7	2.1	3.255	62.3

Fonte: Elaborado pela autora usando PVsyst 7.1.

A figura 7 apresenta os dados estimados que relaciona a escolha dos indicadores para otimizar os melhores resultados de aproveitamento da irradiação, na qual considerada a irradiação média anual para a instalação cujo plano estabelecido é fixo inclinado.

Para os parâmetros de campo estabelecidos foi definida a inclinação a 23° W, o qual relaciona com as perdas ôhmicas, e o ângulo azimute igual a 0° . Estes valores resultam em um fator de transposição de 1,08%, que corresponde à diferença em perdas com relação à orientação ótima e a irradiação disponível no plano inclinado, alcançando assim uma estimativa de perdas igual a 0%. O programa também apresenta uma estimativa meteorológica de incidência anual de aproximadamente 2061 kWh/m^2 .

Figura 7 - Dados de orientação solar, meteorologia incidente anual.



Fonte: Elaborado pela autora usando PVsyst 7.1.

3.3 Conjunto de Módulos Fotovoltaicos

Um módulo fotovoltaico é composto por uma ligação em série de várias células fotovoltaicas. Essa configuração irá definir qual a de tensão de um módulo fotovoltaico (FV). O arranjo misto dos módulos FV's permite aumentar a tensão e a corrente para se alcançar o valor da potência desejada.

João Tavares Pinho e Marco Antonio Galdino, no Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, argumentam sobre como os módulos FV podem ser associados em série/paralelo obtendo assim níveis de corrente e tensão desejados, formando os arranjos fotovoltaicos.

A Tabela 2 apresenta as características do arranjo de ligações dos módulos que estão dispostos em ligações serie e paralelo.

Tabela 2 - Parâmetros dos módulos fotovoltaicos

Arranjo dos Módulos Fotovoltaicos	
Número de módulos conectados em série	10
Número de <i>strings</i> conectados em paralelo	2
Total de módulos fotovoltaicos	20
Valor de referência da irradiância (W/m^2)	1000
Valor da resistência em série por célula (Ω)	0,317
Tensão dos Módulos (V)	44,1
Potência de cada módulo (W)	400

Fonte: Elaborada pela autora.

Os módulos fotovoltaicos são de silício mono cristalinos e apresentam características de potência máxima de 400W e operam numa tensão nominal de 44.1 V com eficiência de 19,4%, além de outros parâmetros que são apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Parâmetros dos módulos fotovoltaicos Canadian Solar.

ELECTRICAL DATA STC*						ELECTRICAL DATA NMOT*					
CS1U	400MS	405MS	410MS	415MS	420MS	CS1U	400MS	405MS	410MS	415MS	420MS
Nominal Max. Power (Pmax)	400 W	405 W	410 W	415 W	420 W	Nominal Max. Power (Pmax)	296 W	300 W	304 W	307 W	311 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	44.1 V	44.3 V	44.5 V	44.7 V	44.9 V	Opt. Operating Voltage (Vmp)	40.8 V	41.0 V	41.2 V	41.4 V	41.5 V
Opt. Operating Current (Imp)	9.08 A	9.16 A	9.23 A	9.30 A	9.37 A	Opt. Operating Current (Imp)	7.26 A	7.32 A	7.37 A	7.43 A	7.48 A
Open Circuit Voltage (Voc)	53.4 V	53.5 V	53.6 V	53.7 V	53.8 V	Open Circuit Voltage (Voc)	49.9 V	50.0 V	50.1 V	50.2 V	50.3 V
Short Circuit Current (Isc)	9.60 A	9.65 A	9.70 A	9.75 A	9.80 A	Short Circuit Current (Isc)	7.75 A	7.79 A	7.83 A	7.87 A	7.91 A
Module Efficiency	19.40%	19.65%	19.89%	20.13%	20.37%	* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m ² -spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.					
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C										
Max. System Voltage	1500V (IEC) or 1000V (IEC)										
Module Fire Performance	CLASS C (IEC 61730)										
Max. Series Fuse Rating	15 A										
Application Classification	Class A										
Power Tolerance	0 ~ + 5 W										

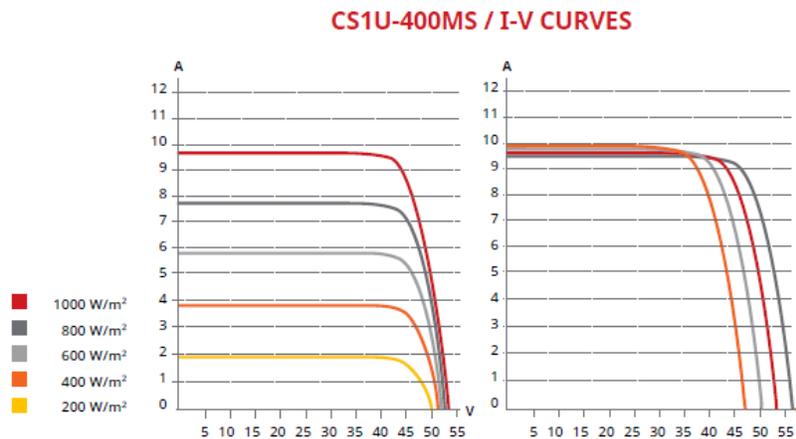
* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

Fonte: Datasheet Canadian Solar HiDM_CS1U-MS-EM.

Segundo Xin Hou et al. (2019), a corrente está relacionada principalmente com a intensidade da irradiância solar incidente sobre o módulo FV e a tensão é afetada principalmente pelo aumento da temperatura de célula. Na Figura 8 apresenta curvas I-Vs características do módulo fotovoltaico utilizado na proposta deste trabalho

O gráfico a direita exemplifica a afirmação com relação à variação de temperatura de célula que pouco altera a corrente elétrica produzida, mas apresenta significativa mudança na tensão do módulo FV.

Figura 8 – Curva I-V de variação da irradiância e curva I-V variação de temperatura de célula.

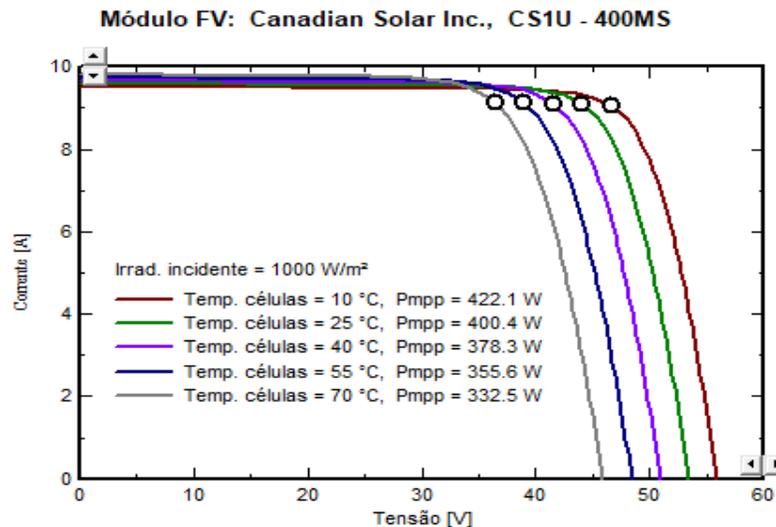


Fonte: Datasheet Canadian Solar HiDM CS1U-400MS

Já o gráfico à esquerda, exemplifica alterações que podem ocorrer com a alteração do nível de irradiância, afetando significativamente a corrente elétrica gerada pelo efeito fotovoltaico.

Também são observado na Figura 9, os níveis de tensão aumentam da mesma proporção em que a irradiância aumenta e, quando a temperatura de célula se eleva, ocorre a redução da geração no ponto de máxima potência.

Figura 9– Potência gerada de acordo com a irradiância solar.



Fonte: Datasheet Canadian Solar Inc., CS1U – 400MS

3.4 Inversor de frequência

Na definição das especificações do inversor, foram levadas em consideração as informações anteriores assim como a eficiência e a tensão de entrada CC dos módulos fotovoltaicos. Por se tratar de uma a instalação conectada a rede elétrica deve ser considerada como parte de um componente desta estrutura, ou seja, quando ocorre uma queda de energia, o inversor deve parar de injetar energia na rede elétrica e deve passar a direcioná-la para a residência ou para o sistema de armazenamento.

O inversor usado neste trabalho é do fabricante SolarEdge modelo SE8K-RWS que possui gerenciamento da produção fotovoltaica e do armazenamento de energia atua, assim como proteção em situações adversas evitando que falhas como sobretensão, subtensão, subfrequência, como gerenciador do sistema de armazenamento de energia.

O inversor possui de 8 kW de potencia máxima de saída CA, modelo trifásico atuando em frequência CA de 50/60Hz, com tensão de saída CA - linha para linha / linha para neutro (nominal) 380/200 : 400/230 Vac, corrente máxima de 13 A e com eficiência de 97,6%,

conforme datasheet, além de conter monitoramento de serviços públicos, proteção contra ilha e permitir configuração de fator de potência adequado a legislação de cada país, além de outras características conforme Figura 10.

Figura 10 - Datasheet SolarEdge modelo SE8K- RWS

/ StorEdge® Three Phase Inverter SE5K-RWS / SE7K-RWS / SE8K-RWS / SE10K-RWS

	SE5K-RWS	SE7K-RWS	SE8K-RWS	SE10K-RWS	
Applicable for inverters with part number	SEXX-XXS48XXXX				
OUTPUT					
Rated AC Power Output	5000	7000	8000	10000	VA
Maximum AC Power Output	5000	7000	8000	10000	VA
AC Output Voltage — Line to Line / Line to Neutral (Nominal)	380/220 ; 400/230				Vac
AC Output Voltage — Line to Neutral Range	184 - 264.5				Vac
AC Frequency	50/60 ± 5				Hz
Maximum Continuous Output Current (per Phase)	8	11.5	13	16	A
Residual Current Detector / Residual Current Step Detector	300 / 30				mA
Grids Supported — Three Phase	3 / N / PE (WYE with Neutral)				
Utility Monitoring, Islanding Protection, Configurable Power Factor, Country Configurable Thresholds	Yes				
INPUT PV					
Maximum DC Power (Module STC)	6750	9450	10800	13500	W
Transformer-less, Ungrounded	Yes				
Maximum Input Voltage	900				Vdc
Nominal DC Input Voltage	750				Vdc
Maximum Input Current	8.5	12	13.5	16.5	Adc
Reverse-Polarity Protection	Yes				
Ground-Fault Isolation Detection	700kΩ Sensitivity				
Maximum Inverter Efficiency	98				%
European Weighted Efficiency	97.3	97.4	97.6		%
Nighttime Power Consumption	< 2.5				W

Fonte:

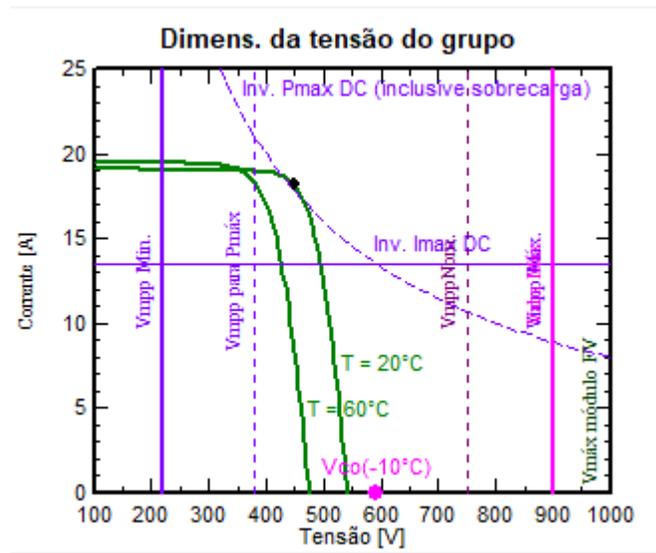
https://www.europe-solarstore.com/download/solaredge/se5-10k-rws_storedge_48v_hybrid_data_sheet_en.pdf

De acordo com a Figura 11, as variações de tensão ocorrem de acordo com a variação de temperatura de célula, o inversor consegue realizar uma varredura buscando os pontos de máxima potência para qualquer variação de tensão.

Algumas condições sobre o número de módulos em série/paralelo devem ser consideradas de acordo com o modelo do inversor. Isto se deve ao fato de que o inversor tem uma faixa de tensão de operação, e neste caso, a variação das tensões e temperaturas de célula precisam atender alguns parâmetros:

- A tensão operacional mínima da matriz, V_{min} , deve estar acima da tensão operacional mínima do inversor. Isso porque a temperatura supera o valor máximo admitido, sendo 60°C .
- A tensão operacional máxima da matriz, $V_{m\acute{a}x}$, deve estar abaixo da tensão operacional máxima do inversor. Isso porque a temperatura supera o valor mínimo admitido, sendo -40°C .

Figura 11– Pontos de máxima potência em tensões distintas.



Fonte: Elaborado pela autora usando PVsyst 7.1.

Conforme apresentado na Figura 11, os dois pontos se encontram dentro da faixa de operação do inversor apresentando valores permitidos de tensão e temperatura de operação da célula, objetivando rastrear os melhores valores de máximo ponto de potência, V_{mpp} . Quando a configuração de matriz desejada não corresponde a esses requisitos, o sistema, geralmente, não está dimensionado adequadamente.

3.5 Sistema com Armazenamento de Energia através Baterias - SAEB

O método de armazenamento de energia através de baterias é o meio que permite reduzir da intermitência das fontes de energias renováveis, suprir a energia do sistema durante

falhas/desligamentos, reforçar o suprimento de energia em horários e pico além de outras funções, segundo apresentado pelos pesquisadores. (Galdino et al., 2018).

O modelo de armazenamento para auto-consumo permite consumir a energia gerada pelo sistema fotovoltaico, a qual foi armazenada no sistema de armazenamento em horários sem geração de energia da micro geração FV proposta, extraíndo o mínimo da energia das concessionárias, além de possibilitar injetar energia excedente na rede elétrica gerando desconto na conta de energia.

Os parâmetros do sistema são apresentados na Tabela 4. São utilizadas baterias de íons de lítio e essas são dimensionadas de forma a armazenar energia sob prévias condições como a capacidade global de descarga é definida em C10, alcançando 1475 ciclos em descarga profunda (DOD) de 50%.

Em condições de sol pleno, através dos cálculos realizados pelo software, o tempo de carregamento é de 2,6 horas, e o descarregamento ocorre com tempo médio 18,1 horas e o descarregamento sob carga máxima em ocorre 6 horas, sendo considerado esses valores sob uma temperatura controlada de 20°C.

Tabela 3 – Configuração do sistema de armazenamento de energia em baterias.

Parâmetros do Sistema de Armazenamento	
Baterias em série (strings)	5
Baterias em paralelo	4
Capacidade global(Ah)	412
Tensão nominal por bateria (V)	12,8

Fonte: Elaborado pela autora

As baterias de íon de lítio suportam correntes mais altas. Esse parâmetro pode ser limitado pela potência máxima do inversor e, no caso de eventual excesso de energia, o sistema fotovoltaico poderá carregar o sistema de armazenamento ou injetar na rede.

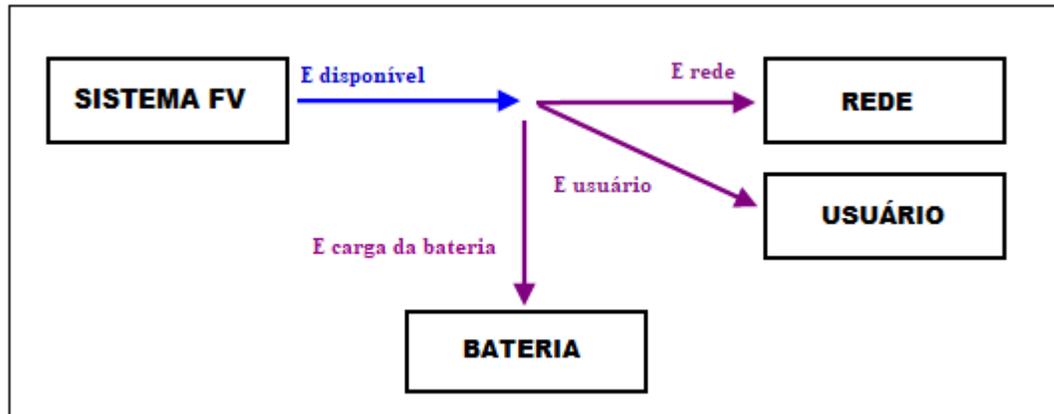
3.6 Descritivo do Modo de Consumo

O sistema tem funcionamento distinto para diferentes cenários de acordo com o consumo, o horário e com as condições climáticas.

- Modo de carga das baterias: a prioridade é atender ao usuário, portanto a energia vai para o consumo direto que pode ocorrer simultaneamente com geração de energia da usina

fotovoltaica. Caso a energia não seja consumida imediatamente, essa passa a ser armazenada no banco de baterias até atingir carga máxima, e somente após esse processo, caso ainda haja geração de energia fotovoltaica, que a energia é injetada na rede elétrica, conforme mostrado na Figura 13.

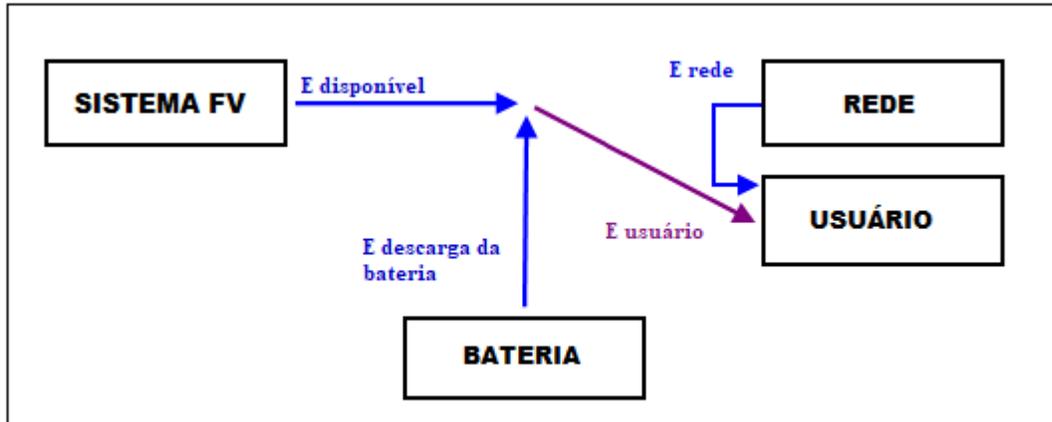
Figura 12- Diagrama do modo de carga diária das baterias.



Fonte: Adaptado de PVsyst 7.1 Help.

- Modo de descarga das baterias: caso micro-usina não esteja produzindo energia ou não seja suficiente para a demanda, o banco de baterias passa a fornecer a energia armazenada para o usuário. Somente, a partir da descarga do sistema de armazenamento, o consumidor passa a consumir energia fornecida pela rede elétrica, como mostra a Figura 14.

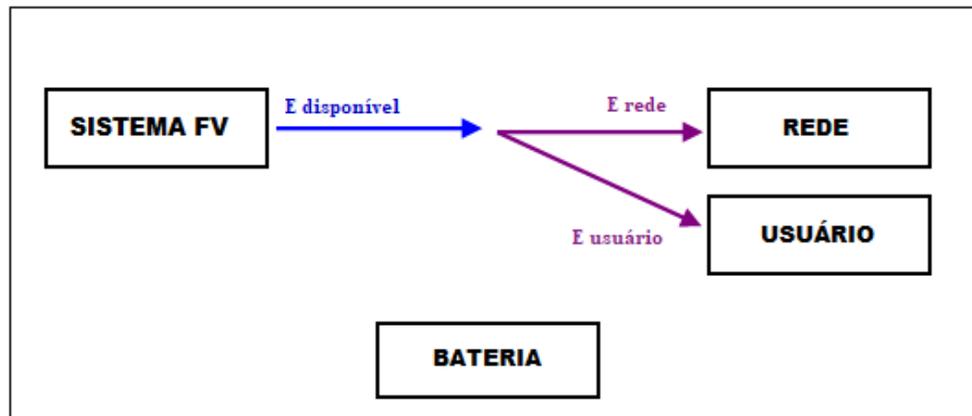
Figura 13- Diagrama do modo de descarga diária das baterias.



Fonte: Adaptado de PVsyst 7.1 Help.

- Modo com armazenamento indisponível: para casos em que a bateria não esteja disponível como, por exemplo, em manutenção, a energia gerada vai toda para o usuário e /ou o excedente é injetado na rede elétrica, de acordo com a Figura 15.

Figura 14- Diagrama de modo direto de geração de energia.

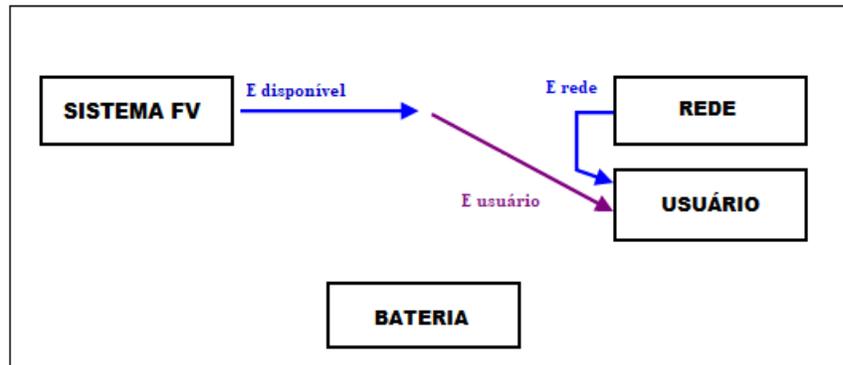


Fonte: Adaptado de PVsyst 7.1 Help.

Outro caso de bateria não disponível é quando essa esteja descarregada ou com baixa densidade energética. Neste caso, o sistema fotovoltaico produz e energia para o consumidor é, caso seja necessário, o fornecimento é suprido pela rede elétrica de acordo com a demanda do consumidor, como na Figura 16. O armazenamento somente voltará a receber energia quando a geração de

energia exceder a necessidade de consumo do usuário, desta forma a energia remanescente será armazenada.

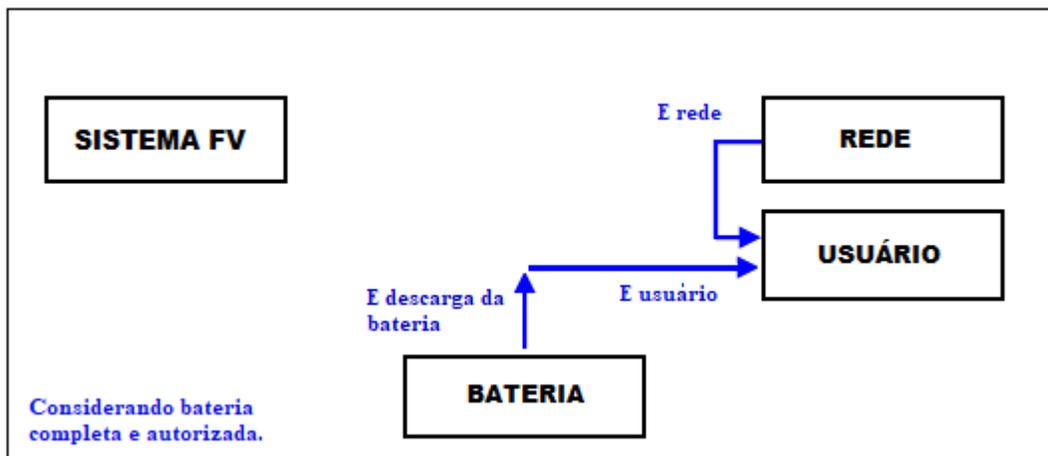
Figura 15- Diagrama de fornecimento sem armazenamento e com auxílio da rede.



Fonte: Adaptado de PVsyst 7.1 Help.

- Modo para cenário de consumo noturno: no caso do período noturno, os quais não têm geração de energia através do sol, o banco de baterias, se carregado e autorizado, descarrega a energia armazenada para o consumidor e, após chegar ao limite de descarregamento a rede elétrica passa a fornecer energia para o usuário. Daí a necessidade de um dimensionamento que oferece no mínimo uma autonomia de atender o suprimento de carga em horários de pico, onde as taxas de energia são mais caras para o consumidor, conforme demonstrado na Figura 17.

Figura 16- Diagrama de consumo noturno.



Fonte: Adaptado de PVsyst 7.1 Help.

3.7 Perdas e Eficiências Energéticas do Sistema

A eficiência de um sistema é medida com base no índice de perdas.

Para Benoît et al. (2015) é irrevogável o acompanhamento de perdas em processos de transformações e conversões de energia. Isso inclui o consumo dos componentes eletrônicos como inversor e perdas ôhmicas, perdas relativas à irradiação, perdas nos módulos que compõem as *strings*, no sistema de armazenamento (cujo desempenho diminui a medida que é usado, além das perdas de conversão de energia e muitas outras situações, que mesmo mínimas, são consideradas na resultante que determina a potência/energia útil do sistema.

Na Figura 18 é apresentada uma sugestão de consumo em percentagem, entretanto as possibilidades de uso, seja por consumo direto, armazenamento ou por troca de energia com a rede elétrica, é caracterizado pelo consumo do cliente, pela disponibilidade de irradiação solar e outros fatores os quais não é possível prever em sua totalidade. Este diagrama fornece com detalhes da qualidade do projeto identificando as fontes de perdas.

Além destas perdas temos as reduções de energia devido ao gasto de consumo de energia do inversor com porcentagem de 3,8% e gasto noturno de 0,1% que resulta em um valor de 15, 923MWh anual na saída do inversor.

A partir desse valor a energia disponibilizada para o consumo imediato é utilizada conforme a demanda do cliente. Considerando nesta etapa as perdas de armazenamento de energia sendo 1,2% para perdas de carregamento, 1,3% para perdas destinadas ao balanço global de energia das baterias e 2,2% para perdas de descarga da bateria.

O sistema de armazenamento tem uma capacidade de 21,1 kWh diário e a utilização do banco de baterias anual é de aproximadamente 29,1%, uma vez que a maior parte da energia gerada é consumida imediatamente correspondendo a 70,9% da energia anual.

A Tabela 4 apresenta os resultados da simulação do sistema de armazenamento que tem capacidade de armazenar 75,35% da energia gerada diariamente pelo arranjo fotovoltaico.

Tabela 4- Principais resultados da simulação do sistema de armazenamento.

Principais Resultados da Simulação	
75,35% do consumo diário	
Eficiência	81,31%
Fração Solar	98,64%
Ciclos do Estado de Uso	80,0%
Produção Específica (kWh/kWp/ano)	1990
Tempo de vidas das baterias	5 anos

Fonte: Elaborado pela autora usando PVsyst 7.1

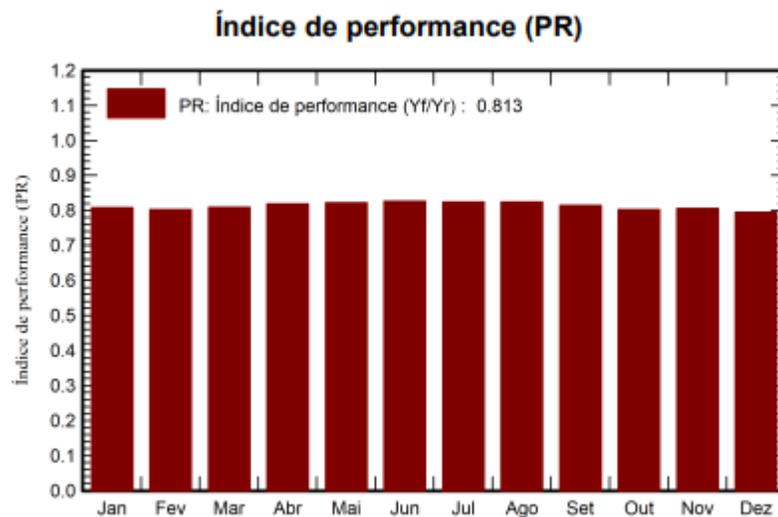
Os resultados acima são apresentados pelo PVsyst nos quais são evidenciados o índice e desempenho que corresponde a eficiência do sistema, contemplando a geração de energia e armazenamento, de 81,31%. A fração solar é razão entre a energia fornecida ao usuário pela fonte solar e a energia necessária ao usuário $E_{solar}/E_{usuário}$ que corresponde a 98,64%. O ciclo do estado de uso é o percentual que apresenta o estado de desgaste das baterias que diminui em função da temperatura real da bateria, da corrente de descarga e da profundidade de descarga.

Esse parâmetro que apresenta um percentual de 80% demonstra o estado de evolução do estado de uso das baterias ao longo de um determinado período que pode ser utilização para avaliação econômica de custos de reposição de baterias.

Os resultados estimados acima pelo software são fatores que influenciam diretamente no tempo de vida útil das baterias que nesse projeto apresentaram um período de 5 anos.

Na Figura 19 é apresentada a eficiência global do sistema em relação à potência nominal instalada e a energia incidente. Esse índice é definido através da razão entre a produção do sistema normalizada (YF) e a energia incidente no plano do coletor (YR).

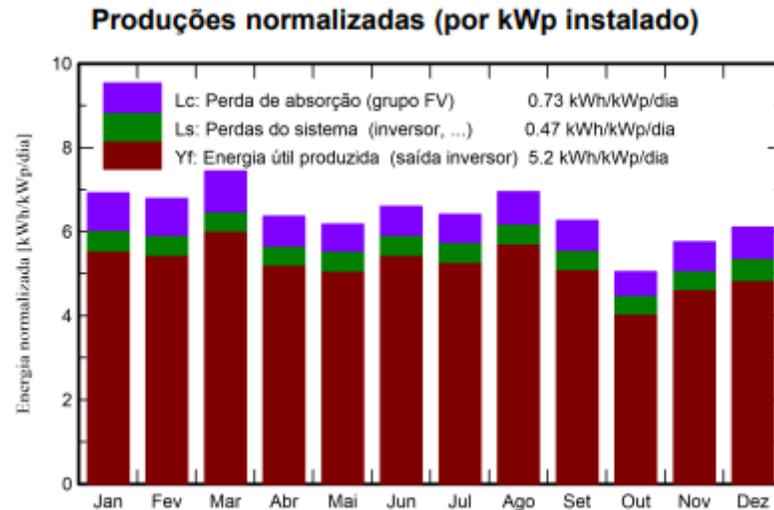
Figura 18– Índice de Desempenho Mensal com Sistema de Armazenamento de Energia



Fonte: Elaborado pela autora usando PVsyst 7.1.

Uma análise futura com base nos dados meteorológicos, no consumo do cliente e nas informações técnicas apresentadas pelo Software é apresentada visando obter uma visão dos resultados que o sistema de geração de energia e armazenamento pode proporcionar sendo apresentadas na Figura 20.

Figura 19 – Produção normalizada de energia útil com sistema de armazenamento.



Fonte: Elaborado pela autora usando PVsyst 7.1.

Nessa figura é apresentada a energia total gerada mensalmente e suas respectivas perdas de absorção da matriz que representam um total de 0,73kWh/kWp/dia, perdas do sistema que inclui consumo de energia própria de equipamentos como inversor sendo 0,47 kWh/kWp/dia resultando em uma energia útil produzida sendo 5,2 kWh/kWp/dia.

3.8 Sistema Fotovoltaico sem Armazenamento

Em caráter comparativo é apresentado um sistema similar ao anterior permanecendo com todos os parâmetros de projetos, porém excluindo o sistema de armazenamento.

Sendo assim a produção normalizada do sistema sem armazenamento, apresentada na Figura 21, apresenta que as perdas de absorção do grupo fotovoltaico (Lc) permanecem inalteradas, uma vez que este parâmetro não apresenta relação com o sistema de armazenamento. Entretanto houve uma redução de perdas relacionadas ao sistema (Ls), nesse caso, direcionadas ao sistema de armazenamento passando a 0,22 kWh/kWp/dia e, por conseqüência, o aumento da energia útil do sistema que passou a apresentar 5,45 kWh/kWp/dia .

Figura 20 - Produção normalizada de energia útil sem o sistema de armazenamento.

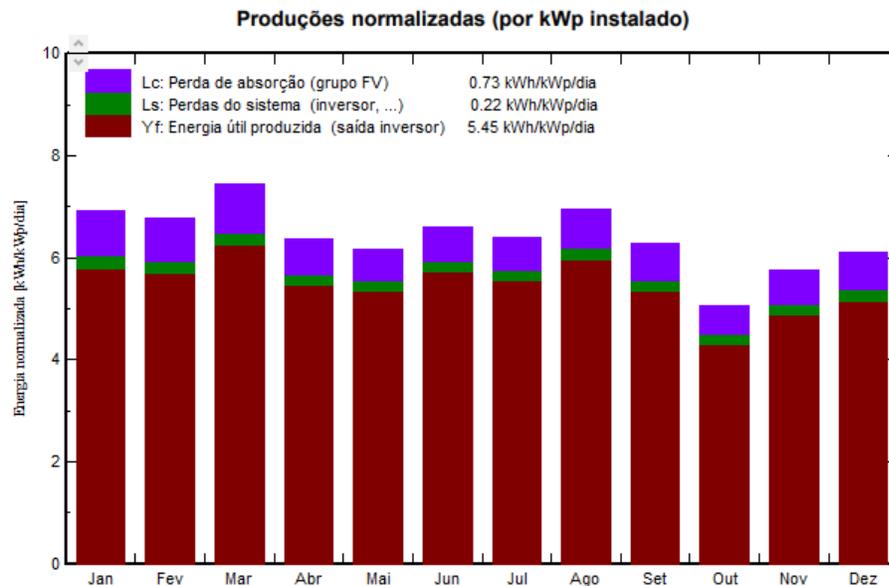
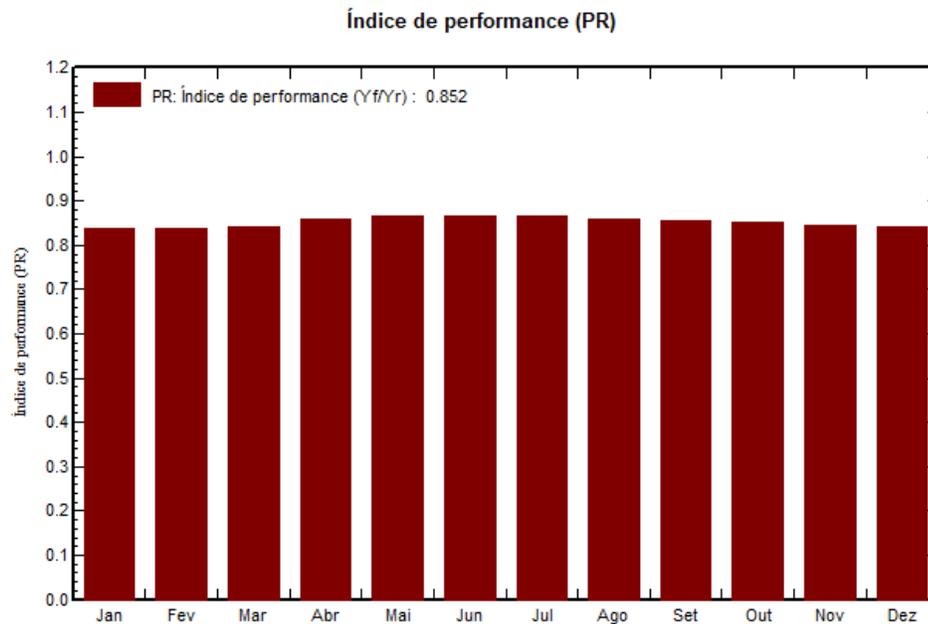


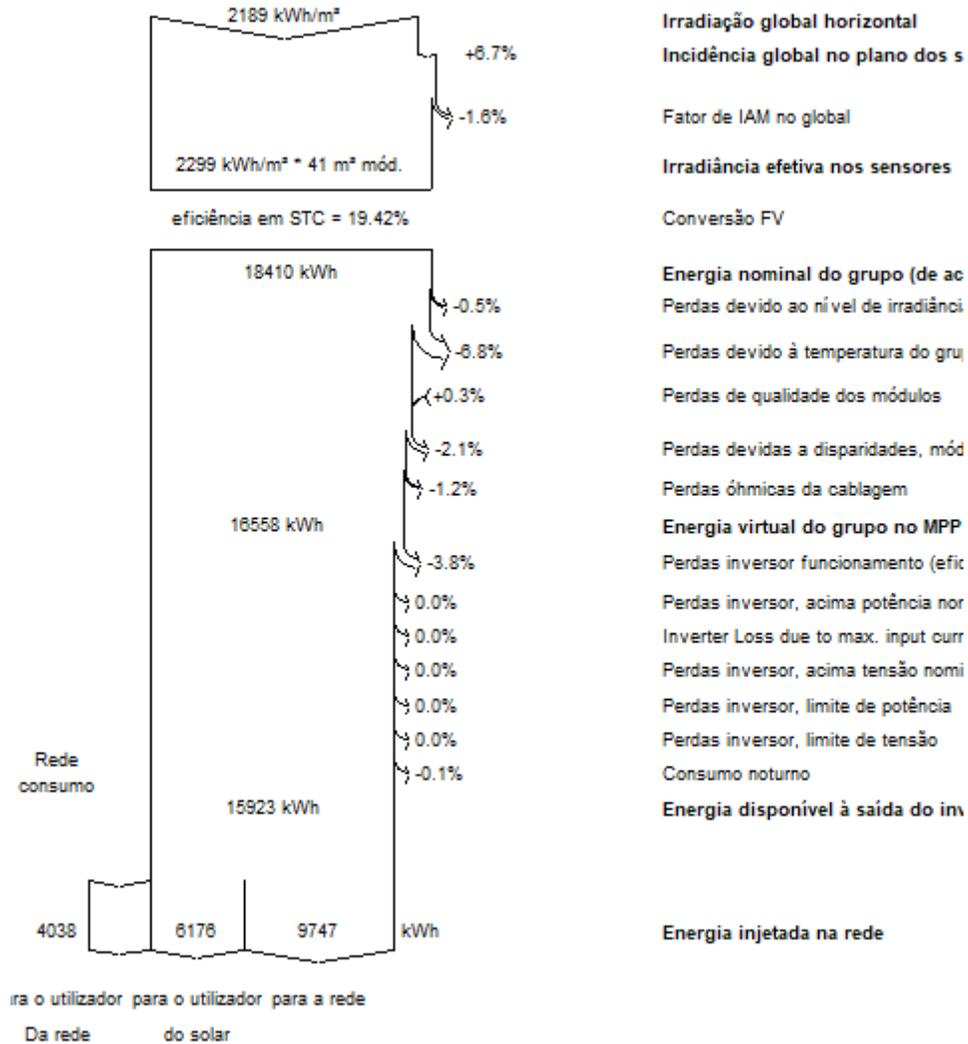
Figura 21 - Índice de Performance Mensal Sem Armazenamento de Energia.



O resultado da performance do sistema (PR) aumenta para 85,2%, Figura 22, totalizando a energia máxima do arranjo de potência disponível virtualmente de 16,55 MWh como é visto na Figura 23.

Figura 22 - Diagrama de Perdas Anual Sem Armazenamento.

Diagrama das perdas por - ano



Fonte: Elaborado pela autora usando PVsyst 7.1.

Apresentando assim o consumo total disponível ao consumidor de 15,923 MWh.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados obtidos no projeto contendo armazenamento apresentam uma eficiência de 81,31%, com perdas de absorção do grupo fotovoltaico de 0,73 kWh/kWp/dia e perdas do sistema de 0,47 kWh/kWp/dia.

Já no projeto sem o dimensionamento de baterias, a eficiência aumenta para 85,2%, mantendo as perdas de absorção do grupo fotovoltaico de 0,73 kWh/kWp/dia, porém apresentou uma redução de perdas do sistema passando para 0,22 kWh/kWp/dia.

Algumas vantagens e desvantagens do sistema com e sem armazenamento podem ser vistos nos tópicos a seguir.

4.1 Vantagem do Sistema Fotovoltaico com e sem Armazenamento

4.1.1 Com armazenamento

Nas simulações contendo geração e armazenamento, foi visto como vantagem a disponibilidade ao usuário de armazenar energia durante o dia e poder utilizá-la no período noturno ou em períodos de indisponibilidade de rede elétrica, podendo ainda despachar energia excedente para a rede elétrica com objetivo de obter créditos para abatimento na conta da energia.

Outro benefício é a autonomia da tomada de decisão quanto ao consumo da energia de acordo com suas necessidades de consumidor, que não só permite a vantagem da sustentação do fornecimento de energia em caso de falta da rede ou baixa irradiação solar, mas também a decisão de evitar consumo da energia da rede em horários de pico ou consumir/reservar a energia armazenada no banco de baterias em situações adversas.

Também é importante considerar os ganhos que são proporcionados à rede elétrica uma vez que o armazenamento permite reduzir o excesso de despacho de energia de minigerações que pode provocar desequilíbrio na rede elétrica.

Além disso, o sistema de armazenamento contribui para aumentar a prestação de serviços ancilares os quais favorecem a relação de custo e benefício da implantação do sistema de armazenamento, oferecendo uma alternativa de prestação de serviços para as concessionárias

como redução do estresse de tensão na rede (*peak shaving*), regulação de frequência, serviços que melhoram a qualidade de energia do sistema, uma vez que a energia gerada é intermitente. E ainda estimula a criação de microrredes que traz benefícios consoantes como a melhoria da eficiência energética reduzindo as perdas no sistema de transmissão e distribuição, o aumento da confiabilidade no fornecimento de energia, já que necessitam de um conjunto de serviços os quais incluem sistemas de produção e de armazenamento de energia, essas são projetadas para operar na ausência do sistema elétrico de potência, como visto na seção 3.7.

É importante ressaltar que a prestação de serviços ancilares para redes de distribuição demandam sistemas de porte bem elevado, superando 1 MWh de energia e 3 MW de potência.

4.1.2 Sem armazenamento

No sistema sem armazenamento a geração solar possibilita ao consumidor a geração de energia durante o dia e o consumo é direto, sendo que a energia não consumida pelo usuário é injetada diretamente na rede e a concessionária gera créditos que são convertidos em descontos na conta de energia. Sem o armazenamento de energia o custo do sistema se torna menor e quanto maior a tarifas de energia mais viável financeiramente é a instalação de sistemas de geração de energia solar que atualmente é de 1 para 1, ou seja a energia gerada no horário diurno é equivalente a energia absorvida no horário noturno.

O sistema de geração fotovoltaico acoplado a rede sem armazenamento, apresenta uma melhor eficiência e menor custo de implantação e manutenção.

4.2 Desvantagem do Sistema Fotovoltaico com e sem Armazenamento

4.2.1 Com armazenamento

As desvantagens relacionadas ao sistema de geração fotovoltaica com armazenamento são referentes ao maior custo na implantação do projeto e apresenta uma pequena perda de eficiência de 0,04%. Outra análise que foi considerada é quanto ao tempo de vida útil das baterias vinculadas a sua atuação. O projeto contempla um sistema de armazenamento de 75,35% da energia diária de consumo que disponibiliza 21,1 kWh/dia de capacidade de armazenamento, devido a altos ciclos de cargas e descargas percebe-se que a vida útil das baterias se tornou

reduzida. As baterias, sendo um importante elemento de composição de custos do sistema, devem ter sua vida útil avaliada detalhadamente, o que é feito no próximo item.

4.2.2 Sem armazenamento

Com relação ao sistema fotovoltaico sem armazenamento a desvantagem é relativa ao baixo controle da gestão da energia, sendo obrigado a injetar a energia gerada e não consumida diretamente na rede em horários de tarifas baixas, fora de ponta e consumir em horários de tarifas mais caras, na ponta, nos horários das 17:00 horas as 22:00 horas. Outra desvantagem nesse sistema é o problema com fluxo reverso sem o menor controle, ocasionando problemas na rede, principalmente se a geração não for sincronizada com a carga consumida, ou carga remota, mesmo com conversores e inversores programados para fazer esse ajuste, o controle fica dependendo dos operadores de rede, e isso pode onerar o desempenho e custo do sistema.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados alguns conceitos para o embasamento teórico obtidos das referências bibliográficas, também foi apresentado um projeto de sistema de geração fotovoltaico com e sem sistema de armazenamento de energia conectado à rede. A simulação foi feita no *PVsyst 7.1* com objetivo de realizar um dimensionamento eficiente utilizando baterias de lítio.

O objetivo principal é apresentar aspectos de vantagens e desvantagens que um sistema de armazenamento de energia pode proporcionar ao consumidor, como já visto em estudos e implantados em diversos lugares do mundo.

Embora o custo do armazenamento de energia ainda seja considerável no valor final de um projeto, a normatização no Brasil destes sistemas poderá permitir um retorno ainda mais favorável com a prestação de serviços ancilares, como: controle de carga e descargas, controle de reativos, controle de fluxo reverso, entre outros.

Apesar do custo do sistema de armazenamento e do inversor, sendo um modelo que engloba a gestão do sistema de armazenamento, apresentarem um custo mais elevado orçamento, perdas comparando os dois sistemas são relativamente baixas 0,04%, agravado pela vida útil das baterias que, neste caso, é considerada satisfatória em vista do alto custo que as baterias de íons de lítio representam no projeto. Entretanto, ressalta-se que comparadas a outras tecnologias de baterias estas apresentam melhor desempenho e vida útil prolongada.

Considerando as análises feitas tanto na parte teórica quanto na parte de simulação neste trabalho, o sistema de armazenamento apresenta diversos fatores de viabilidade, principalmente quando é bem aproveitado, estando associado à prestação de serviços ancilares à rede.

Desta maneira, todas as funcionalidades da microusina sustentável são aproveitadas, assegurando a diminuição das intermitências da geração fotovoltaica quando conectada à rede, além de garantir a energia necessária ao usuário que também é produtor, uma energia de qualidade,

despachável em horários de ponta e fora de ponta, como também em dias de baixa irradiação solar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.G. **Ter-Gazarian**. **Energy Storage for Power Systems**. Second Edition. Londres. British Library Cataloguing, 2011. 292p. (187)

Abbas A. Akhil, Georgianne Huff, Aileen B. Currier, Benjamin C. Kaun, Dan M. Rastle, Stella Bingqing Chen, Andrew L. Cotter, Dale T. Bradshaw, William D. Gauntlett. Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA. Disponível em <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/49323464/SAND2013-5131.pdf?1475519436=&response-contentdisposition=inline%3B+filename%3DDOE_EPRI_2013_Electricity_Storage_Handbo.pdf&Expires=1593726360&Signature=MEfIFKIKIHwmHRlz~OyOo3TXoYMWI4J7EfHpLa~LdoO1ariV7SAIZEnXBy383ym7Fy8tcKbC5phXr7mTfrQks44P3-vf791M1WIUVSozswCZIAIT0iAnwXbm9Ow60pf9R6F3zej2eddTu1IrLxXV7Yk0~pvVWB0d5oA2VF~DXgYAe5Y0yYqBraJvOhXNIGlcBPKUWgnT1MW72BcNIEBG~TKxUkecJAeOepfAGD-EoHCqX2x8D4HWdMYph6n0pwH~vDUNNon~CE2OmpwkUHzcecn3jiMZ52-uE5Te2-iYPnELKW5IHhlsRQuQxqjSs1AeQrQzRMuuwr0lwXEF48O8LQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA> acessado em abril 2020.

ADB- Asian Development Bank. Handbook on Battery Energy Storage System. 2018. 94p. Disponível em <<https://www.adb.org/sites/default/files/publication/479891/handbook-battery-energy-storage-system.pdf>> acessado em abril 2020.

Ahmad Arabkoohsar, Meisam Sadi - Mechanical Energy Storage Technologies,2021. 101-124p. Disponível em <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820023-0.00005-5> acessado em Janeiro 2021.

Benoît Robyns, Bruno François, Gauthier Delille, Christophe Saudemont - Energy Storage in Electric Power Grids. First Edition. Great Britain. British Library Cataloguing-in-Publication, 2015. 308 p. (20, 25)

CEMIG- Companhia Energética de Minas Gerais. Simulador de Consumo. <https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Documents/SimuladorDeConsumo/Cemig%20-%20Estime%20seu%20Consumo2.htm>. Acessado em novembro 2020.

Datasheet Canadian Solar HiDM_CS1U-MS_EN. Módulos Fotovoltaicos, disponível em https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/Canadian_Solar-Datasheet-HiDM_CS1U-MS_EN.pdf acessado em abril 2020.

Datasheet Sunny Boy 6000TL-US / 7000TL-US / 8000TL-US /9000TL-US / 10000TL-US / 11000TL-US. Disponível em <http://files.sma.de/dl/10707/SUNNYBOY6-11TLUSDUS144518W.PDF>, acessado em abril 2020.

Divya, K. C.; Ostergaard. J. Battery energy storage technology for power systems- An overview. *Electric Power Systems Research*, 2009.v.79n.4, p. 511-520, 2009. ISSN 03787796.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Sistemas de Armazenamento em Baterias. Brasília, Ministério de Minas e Energia, 2019. 36 p. (22- 25)

Holger C. Hesse , Michael Schimpe , Daniel Kucevic, Andreas Jossen - Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids. Disponível em <https://doi.org/10.3390/en10122107>, acessado em março 2020.

Huggins, Robert A. Energy Storage. First Edition. New York: Springer, 2010. 406 p. (132 - 135).

Jardel Eugênio Silva. Dissertação de Mestrado. Veículos Elétricos e a Geração Distribuída a partir de Sistemas Fotovoltaicos. Disponível em http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4190/1/CT_PPGSE_M_Silva%2C%20Jardel%20Eugeni o%20da_2019.pdf. Acessado em 07 de janeiro 2021.

João Tavares Pinho, Marco Antônio Galdino. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. CEPEL- CRESESB. Rio de Janeiro, 2014. 530 p. (123).

Mitavachan Hiremath, Karen Derendorf, Thomas Vogt. Comparative Life Cycle Assessment of Battery Storage Systems for Stationary Applications. 2015. Disponível em <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es504572q>> acessado em março 2020.

Ogunniyi E. O., HCvZ Pienaar. Overview of Battery Storage System Advancemete for Renewable (Photovoltaic) Energy Applications. Disponível em <DOI: 10.23919/DUE.2017.7931849> acessado em março 2020.

ONU - Organizações das Nações Unidas. Disponível em <<https://nacoesunidas.org/acao/mudanca-climatica/>> acessado em abril 2020.

Patrick T. Moseley, Jurgen Garche, Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing. First Edition. Germany: Elsvier 2015, p. (7-9).

PVsyst photovotsic software - PVsyst V7.1, versão trial, disponível em <http://www.pvsyst.com>. Acessado em novembro 2020.

Seminário Sobre Lítio III, 2018, Rio de Janeiro. Marco Antonio Galdino e. Jose Geraldo de Melo Furtado. Tecnologias de Bateria de Lítio utilizadas em Sistemas Fotovoltaicos: Tendências e Perspectivas. CEPEL – Centro de Pesquisa de Energia Elétrica, 28p. Disponível em <<https://www.cetem.gov.br/images/eventos/2018/iii-litio-brasil/apresentacoes/tecnologias-bateria-litio-sistemas-fotovoltaicos.pdf>> acessado em abril 2020.

SANTOS, K. P.; MONTE, A. C. S. B. Compensação de reativos em sistemas elétricos de potência. 2009. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Curso de Engenharia Elétrica). Universidade Estadual do Piauí, Teresina, 2009.

Xin Hou, Daoyuan Wen, Fangqin Li, Chuang Ma, Xiaotong Zhang, Haijun Feng, Jianxing Ren. Influence of Light And its Temperature on Solar Photoltaic Panels. Disponível em <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911801047> acessado em fevereiro 2020.

Yaşar Demirel. Energy: Production, Conversion, Storage, Conservation and Coupling. Second Edition. Switzerland: Springer, 2016. 616 p. (344).

Yáscara F.F. Costa e Silva, Edson C. Bortoni. Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica em redes Inteligentes: Características Oportunidades e Barreiras. Revista Brasileira de Energia, 2016. Vol 22. Disponível em <file:///C:/Users/Adriana/Downloads/351-Texto%20do%20artigo-332-1-10-20180308%20(1).pdf>. Acessado em janeiro de 2021.

Yuping Wu. Lithium-Ion Batteries. First Edition. Boca Raton. CRC Press, 2015. 582p. (6 - 493).