

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GABRIEL DIAS ULIANA

# Aplicações de BESS no Contexto Conectado e Isolado à Rede.

VIÇOSA  
2023

GABRIEL DIAS UIANA

# Aplicações de BESS no Contexto Conectado e Isolado à Rede.

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 – Projeto de Engenharia II – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos.

VIÇOSA  
2023

**GABRIEL DIAS ULIANA**

# Aplicações de BESS no Contexto Conectado e Isolado à Rede

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 – Projeto de Engenharia II – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

08/12/2023

## COMISSÃO EXAMINADORA

---

Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos - Universidade Federal de Viçosa

---

Ricardo Estefano Rosa - WEG

---

Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Universidade Federal de Viçosa

---

Prof. Dr. Victor Pellanda Dardengo- Universidade Federal de Viçosa

# Aplicações de BESS no Contexto Conectado e Isolado à Rede

Gabriel Dias Uliana  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Viçosa  
Viçosa, Brasil

**Resumo** — O suprimento de energia de forma constante, dentro dos padrões de qualidade, e de forma contínua é o grande objetivo do setor energético, e dentro deste contexto vem-se destacando os sistemas de armazenamento, sendo os Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) o qual se sobressai pela sua aplicabilidade e maturidade comercial. Portanto, neste trabalho de será analisada a aplicação de BESS, quando este tem acesso a rede elétrica e quando atendendo sistemas isolados. Para tal se realizará um levantamento de seus componentes, principais aplicações, forma de dimensionamento e simulação de funcionamento para atendimento de Sistemas Isolados no Brasil, no contexto da transição energética. Visando, dessa forma construir um embasamento teórico do poder de penetração deste equipamento dentro do setor elétrico brasileiro.

**Abstract** — The constant supply of energy, within quality standards, and continuously is the main objective of the energy sector, within this context the storage systems have been highlighted, being the Battery Energy Storage Systems (BESS), which stands out due to their applicability and commercial maturity. Therefore, this work will analyze the application of BESS, when it has access to the electricity grid and when serving isolated systems. To this end, a survey of its components, main applications, design and simulation of operation will be carried out to serve Isolated Systems in Brazil, in the context of the energy transition. Aiming to build a theoretical basis of the penetration power of this equipment within the Brazilian electricity sector.

**Palavras-chave** — BESS, armazenamento, energia, rede, SISOL.

## Introdução

Na área energética, um dos maiores desafios residem na manutenção de um suprimento constante, de qualidade, com custos controlados e compromisso socioambiental. Em relação ao meio ambiente, o Estudo da Comissão Econômica da Europa (Unecce) revela que ações ousadas e sustentadas têm de começar agora para maximizar uso de tecnologias de baixo e zero carbono [1]. Dentre as ações recomendadas pelo relatório devemos destacar a recomendação de aumentar a eletrificação de todos os setores e investimento em formas de armazenamento.

As tecnologias de armazenamento de energia têm o potencial de contribuir significativamente para alcançar os objetivos de segurança energética e redução das emissões de carbono na atmosfera. Visto que estas possibilitam:

- O aproveitamento eficiente de diversas fontes renováveis;
- A integração de diferentes fontes de geração de energia com o uso final de energia elétrica;

- A geração de energia elétrica próximo ao consumidor
- O acesso à energia elétrica em regiões não conectadas à rede, a partir de fontes intermitentes;
- O aumento da estabilidade, flexibilidade, confiabilidade e resiliência da rede de energia elétrica, a inserção e incremento do uso de fontes renováveis [2].

Algumas tecnologias de armazenamento já estão maduras e sua utilização para firmar a energia de fontes intermitentes resulta em fontes equivalentes que competem comercialmente com as tecnologias convencionais de geração em diversas aplicações para o setor elétrico [2]. Dentre estas tecnologias destaca-se o armazenamento de energia em baterias, a qual sua aplicabilidade e penetração de mercado vem se consolidando nos últimos anos.

O Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias, mais conhecido por sua sigla em inglês BESS (*Battery Energy Storage System*), é um dispositivo capaz de armazenar energia e disponibilizá-la em momento oportuno. Categorizado entre as tecnologias de armazenamento como eletroquímica, como apresentado na Figura 1.

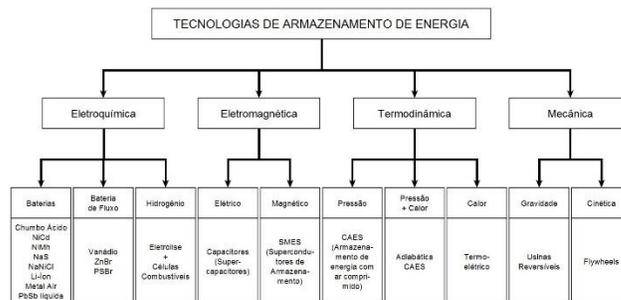


Figura 1- Tecnologias de Armazenamento de Energia [3].

Neste sistema um conjunto de células de bateria de baixa voltagem/potência é conectado em paralelo e em série para alcançar uma característica elétrica desejada. Cada célula é composta por um eletrólito líquido, pasta ou sólido juntamente com ânodo e cátodo, os quais passam por reações químicas. A reação é reversível e permite que a bateria forneça a energia absorvida para descarregar. Podemos destacar como vantagens do BESS as seguintes características:

- Tempo de resposta rápido;
- Alta eficiência de ida e volta (*Round-trip*);
- Elevadas densidades de energia e potência;
- Tecnologia madura;

- Disponibilidade comercial [4].

Uma análise do contexto brasileiro, temos a tendência de que o armazenamento de energia é realizado principalmente por meio de reservatórios de acumulação para garantir o fornecimento de eletricidade, com a geração termelétrica atuando como *backup* no sistema interligado e como base nos sistemas isolados. No entanto, a diminuição gradual na construção de usinas hidrelétricas com reservatórios tem levado a um aumento na participação da geração termelétrica, especialmente durante períodos de baixa disponibilidade hídrica. O sistema elétrico brasileiro é de natureza hidrotérmica, com uma participação crescente das fontes renováveis intermitentes.

Diante desta situação de uso crescente das fontes renováveis e intermitentes de geração de energia elétrica em substituição ao emprego de combustíveis fósseis amplia-se, na ausência de reservatórios de acumulação, a necessidade de formas de armazenamento de energia para compatibilizar a produção e a demanda de energia elétrica [2].

No entanto, o armazenamento de energia não se restringe apenas a lidar com as variações de longo e curto prazo na produção de energia. O BESS pode desempenhar um papel vital em fornecer características essenciais aos sistemas elétricos. Isso inclui suprimento de *backup* para enfrentar falhas nas unidades geradoras, equilíbrio na curva diária de carga (*load leveling*), redução nos picos de demanda (*peak shaving*) para economia do consumidor, reserva girante (*spinning reserve*) para garantir o fornecimento contínuo após a perda inesperada de parte da geração, e manutenção da qualidade de energia nas redes de transmissão e distribuição. Além de várias outras aplicações que serão apresentadas no decorrer deste trabalho.

Análises de mercado para do Sistema de Armazenamento de Energia da Baterias, mostram uma grande tendência de crescimento neste setor, espera-se que o tamanho do mercado de BESS cresça de USD 27.69 bilhões em 2023 para USD 45.84 bilhões em 2028. A médio prazo, é provável que o declínio nos preços das baterias de íon-lítio e o aumento da adoção de energia renovável impulsionem significativamente o mercado de sistemas de armazenamento de energia por baterias durante este período [5]. A figura abaixo apresenta uma projeção para o preço de baterias de íon-lítio até 2030.

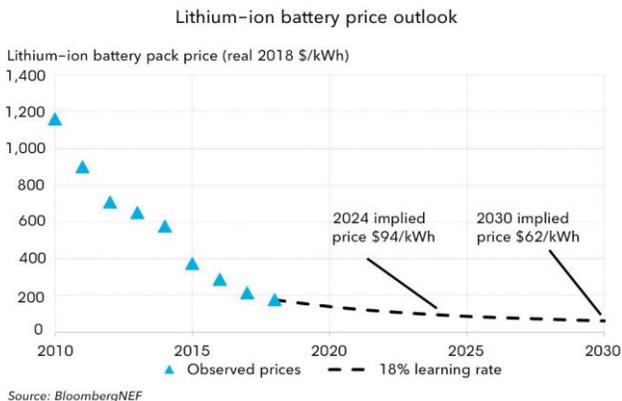


Figura 2- Redução estimada do preço das baterias de íon-lítio [6].

Diante deste potencial de mercado e do grande número de aplicações possíveis no setor energético, o BESS se mostra como uma ferramenta a ser analisada por todos aqueles que estejam envolvidos nos setores de geração, distribuição e comercialização de energia.

## I. OBJETIVOS

### A. Objetivo Geral

O Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias, como exposto anteriormente, é um equipamento com grande aplicabilidade. Sendo assim, o presente estudo tem por objetivo levantar as principais áreas de atuação do BESS e entender seus mecanismos de funcionamento. Para tal, tem por objetivos específicos:

### B. Objetivos Específicos

1. Análise dos principais componentes de um Sistema BESS;
2. Aplicações do armazenamos de energia em baterias quando disponível a conexão à rede;
3. Aplicação do armazenamento de energia em baterias no contexto isolado da rede elétrica, visando contribuir par transição energética.

## II. SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS

O sistema de Armazenamento de Energia em Baterias, tem em sua composição cinco principais itens.

### A. Baterias

#### 1) Tecnologia Utilizada

A bateria é caracterizada como um dispositivo composto por células que armazenam energia, no qual a energia química é convertida em energia elétrica [7]. Atualmente existe uma ampla variedade de tipos de baterias, cada um com suas próprias características construtivas, como capacidade de potência, capacidade de armazenamento, vida útil, eficiência, faixa de temperatura operacional, profundidade de descarga, densidade energética e taxa de autodescarga. Essas particularidades conferem vantagens particulares em diferentes aplicações.

Dentre as diferentes tecnologias de baterias destacam-se as baterias de chumbo ácido e as baterias de íons de lítio. As baterias de chumbo-ácido (Pb-Ac) foram desenvolvidas há mais de 150 anos sendo amplamente empregadas nas indústrias automobilísticas, iluminação, sistemas de ignição e fontes de alimentação ininterruptas, devido à sua notável confiabilidade e custo reduzido [8]. Entretanto, é crucial ponderar sobre as limitações associadas a essa tecnologia, como a baixa densidade de energia, maior peso e resposta insatisfatória em situações de descarga profunda.

Em 1991, a Sony lançou a primeira bateria recarregável de íon-lítio comercialmente, usando grafite como ânodo e LiCoO<sub>2</sub> como cátodo, com uma tensão de 3,6 V. Desde então, devido às suas características atrativas, como alta densidade de energia e potência, e à demanda crescente por

dispositivos portáteis (como telefones celulares e computadores) e veículos elétricos, a tecnologia de armazenamento de energia de íon-lítio tem sido amplamente pesquisada e desenvolvida em colaboração global entre empresas, universidades e centros de pesquisa [9].

As células de Li-ion têm as vantagens de alta densidade energética, alta densidade de potência, longo ciclo de vida entre outros [10]. Tendo como referência Figura 3 podemos observar que esta tecnologia de baterias se destaca por sua abrangência maior de potência e de tempo, mostrando-se com maior poder de adaptação a diferentes aplicações.

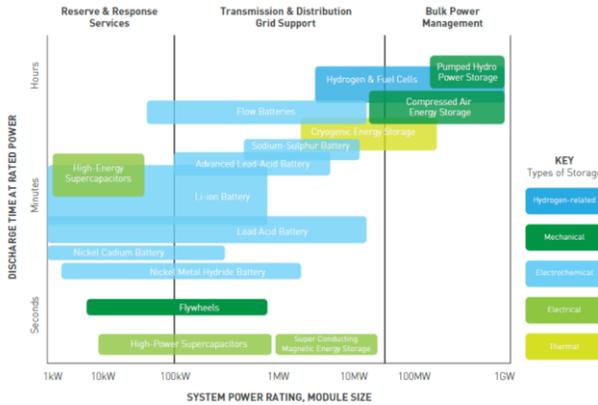


Figura 3- Sistemas de Armazenamento de energia [11].

Existem diversas químicas de baterias de Li-ion, sendo as mais conhecidas a Lítio Ferro Fosfato (LiFePO<sub>4</sub>), Polímero de Lítio (LiPO), Lítio Cobalto (LCO) e Níquel Manganês Cobalto (NMC), sendo que cada tipo de bateria tem as suas características de funcionamento. Para critério de comparação, na Figura 4, foram adotados os parâmetros de capacidade, custo, tempo de vida, desempenho, segurança e potência. Onde podemos perceber que o armazenamento baseado em LiFe tem uma distribuição mais homogênea do gráfico, o que mostra a sua escolha a mais considerável para a maioria das aplicações. Esta tecnologia reúne várias vantagens como durabilidade, taxa de autodescarga reduzida, maior número de ciclos de vida e rendimento mais elevado.

A segurança também é um aspeto crucial a ser observado na escolha de uma tecnologia de armazenamento de baterias. Quando usadas em grandes tamanhos, o risco/falha de segurança é maior quando comparada com tamanhos menores, como por exemplo nos veículos elétricos. Perante essa necessidade surge o fosfato como material de cátodo, que vem tornar as baterias LiFePO<sub>4</sub> muito seguras. Sendo assim, podem operar a altas temperaturas, continuando a ser estáveis. Tais fatos tornaram esta tecnologia a mais segura no mercado. Outra grande vantagem são os materiais e químicos que a constituem, que não são poluentes e são recicláveis [12].

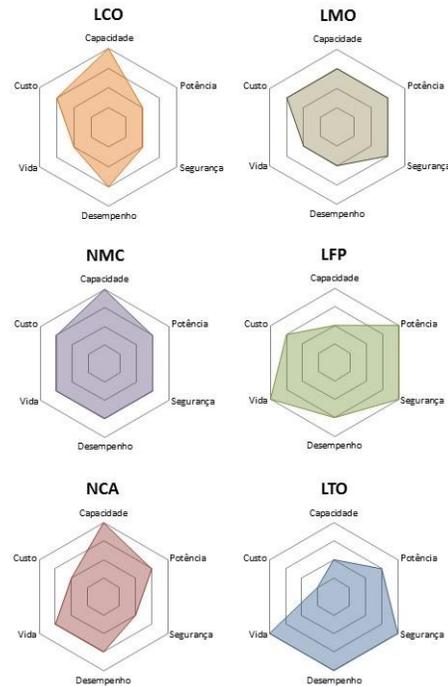


Figura 4- Comparação entre os vários tipos de baterias de Lítio íon [13].

## 2) Disposição Construtiva

As células da bateria podem ser conectadas em série e paralelo, buscando dessa forma o ajuste da tensão e capacidade a ser atendida pelas cargas. Assim podendo agrupá-las em módulos e racks, que por sua vez são agrupados dentro de contêineres preparados para operar ao abrigo do tempo.

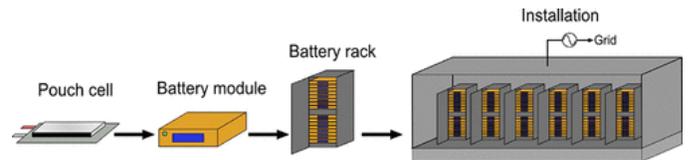


Figura 5- Disposição das células de bateria [14].

### B. Sistema de Conversão

O Sistema de Conversão de Potência conhecido por sua sigla em inglês PCS (*Power Conversion System*) é o responsável por converter energia armazenada no banco de bateria, em corrente contínua, para corrente alternada na mesma frequência a ser utilizada pelas cargas.

Além das funções normais da bateria, o PCS também pode ser utilizado no modo para corrigir o fator de potência, melhorar a regulação de tensão ou reduzir o flicker no ponto de conexão. Os principais componentes do PCS incluem:

- Chaveamento e proteção de entrada primária
- Transformador principal de redução
- Transformador auxiliar de redução e distribuição de energia
- Redes de filtros de onda senoidal
- Inversores
- Chaveamento e proteção de CC

- Controle local. [15]

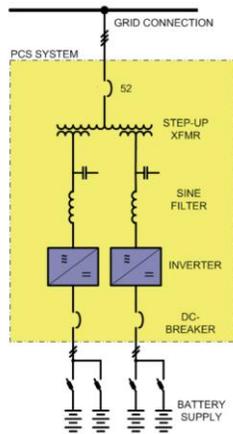


Figura 6- Diagrama unifilar simplificado para BESS [15].

O controle de frequência é tipicamente realizado por um controlador de declive de frequência que determina a variação da potência ativa ( $\Delta P$ ) trocada com a rede CA para um desvio de frequência dado em relação a um valor de referência. Uma vez que os conversores de energia normalmente são capazes de operar nos 4 quadrantes de sua curva de capacidade PQ, eles também são capazes de trocar potência reativa simultaneamente. Dentro deste contexto, a troca simultânea adicional de potência reativa, que é vista como um meio viável para a regulação de tensão local no nível da rede de distribuição. Similarmente ao caso do controle de frequência, desvios de tensão local em relação ao valor nominal podem ser usados como entrada para determinar a variação necessária na potência reativa ( $\Delta Q$ ) [16].

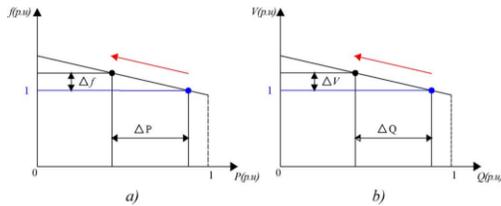


Figura 7- Dropp control f-P e V-Q [17].

É válido ressaltar que as curvas de capacidade são únicas para o hardware utilizado, contudo, espera-se encontrar dependências similares em todos os conversores de BESS de grande escala utilizados.

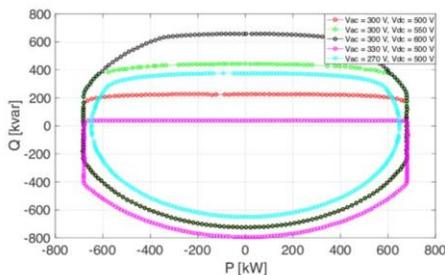


Figura 8 - Curva de Capacidade PCS BESS [16].

### C. Transformador

Um transformador é um dispositivo que converte, por meio da ação de um campo magnético, CA de uma determinada frequência e nível de tensão em energia elétrica CA com a mesma frequência, mas em outro nível de tensão, utilizando um campo magnético. Ele é composto por duas ou mais bobinas de fio enroladas em torno de um núcleo ferromagnético compartilhado. Geralmente, essas bobinas não estão eletricamente conectadas entre si, a única ligação entre elas é o fluxo magnético presente dentro do núcleo [18].

Dentro das aplicações dos sistemas de armazenamento estes são utilizados para converter a tensão de saída do PCS para a tensão a ser atendida para as cargas. Como também, tem sua aplicação como isolador dos sistemas do BESS atenuando ruídos e distorções.

O outro ponto a ser considerado em relação ao transformador é o casamento de impedâncias, este equipamento possibilita a máxima transferência de potência ajustando a relação de espiras visando igualar as impedâncias entre a carga e a fonte (PCS).

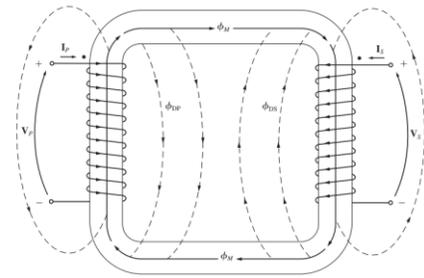


Figura 9- Fluxos concatenado e mútuo em um núcleo de transformador [18].

### D. BMS

O BMS (Battery Management System) (Sistema de Gerenciamento de Bateria) é o equipamento responsável por monitorar e manter as células que compõem as baterias dentro dos seus limites de funcionamento. Ele pode equilibrar as células, calcular o estado de carga (SOC) e o estado de saúde (SOH) e proteger a bateria contra sobretensão, sobretensão e outras condições fora do limite. Este equipamento controla a carga e a descarga e pode interromper esses processos para salvar a bateria de possíveis perigos [19].



Figura 10- Funcionalidades BESS [19] Adaptado.

Para garantir esta funcionalidade o BMS pode utilizar alguns princípios de balanceamento das células, os quais serão destacados dois deles. O Princípio do balanceamento dissipativo, amplamente empregado devido à sua simplicidade e custo reduzido. Esse método consiste na dissipação de energia através de um resistor, convertendo-a em calor. Essencialmente, ele redireciona o excesso de energia das células mais carregadas para permitir o carregamento equilibrado das outras células. No entanto, sua funcionalidade se limita à fase de carga da bateria e não contribui de forma alguma durante a descarga do sistema. E o Princípio do balanceamento não dissipativo, onde à equalização obtida pela transferência de energia entre células individuais. Esta transferência energética melhora o desempenho tanto durante o carregamento quanto durante a descarga de um conjunto de baterias. Essa transferência de energia entre as células pode ser realizada por meio de diferentes métodos, como circuitos com capacitores chaveados, indutores ou conversores CC-CC [20].

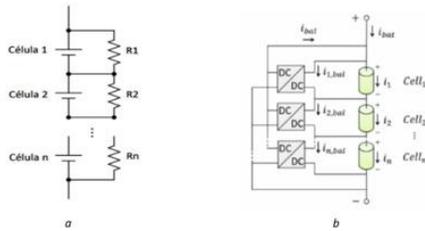


Figura 11 - Balanceamento Dissipativo (a) e não Dissipativo (b) [20]

O Anexo A apresenta definições dos conceitos abordados na Figura 10.

### E. EMS

O EMS (Energy Management System) (Sistema de Gestão de Energia) é o responsável pelo controle geral do sistema de armazenamento de energia. Atua controlando os padrões de funcionamento do BESS, monitorando a carga e descarga e otimizando seu funcionamento. Além disso, disponibiliza diversos indicadores de desempenho e ações e testes relacionados à operação, manutenção e controle dos sistemas de proteção.

A

Figura 12 é uma representação dos componentes do BESS onde as conexões de controle estão indicadas pelas linhas pontilhadas.

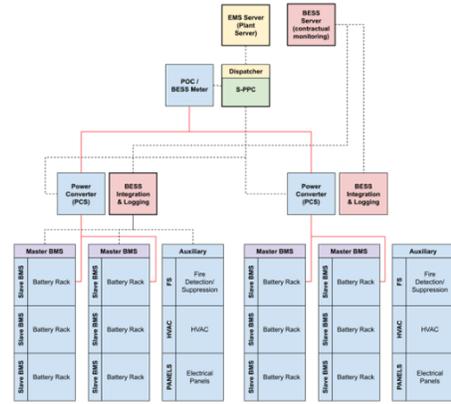


Figura 12- Sistema BESS [21].

## III. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO APLICAÇÕES COM ACESSO À REDE

Podemos dividir as aplicações dos sistemas de armazenamento de energia em duas principais propostas, as baseadas em potência e em energia. Como também em aplicações antes e depois do medidor.

As baseadas em potência têm como objetivo principal a entrega rápida e precisa de energia à rede ou ao usuário local, enquanto as baseadas em energia tem em sua aplicação entrega de grandes quantidades de energia ao comprador.

TABELA 1: Aplicações Baseadas em Energia e Potência

Aplicação	Energia	Potência
Objetivo	Entrega de grandes quantidades de energia	Reação rápida e precisa às necessidades da rede ou de usuários locais
Prioridades de desempenho	Vida Útil	Tempo de resposta
	Alta eficiência	Alta precisão e disponibilidade

Em relação ao local de instalação do BESS temos as aplicações antes (BTM, behind-the-meter) ou depois (FTM, front-of-meter) do medidor de energia elétrica. Basicamente, as aplicações BTM são voltadas para atender às necessidades e benefícios do consumidor final, enquanto as aplicações FTM têm um impacto mais amplo no sistema elétrico, ajudando a melhorar a estabilidade e a eficiência da rede elétrica como um todo.

TABELA 2: Aplicações em Relação a localização [22]

Localização	Instalado após o medidor de energia elétrica, no lado do consumidor final.	Instalado antes do medidor de energia elétrica, no lado da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.
Propósito	Focadas em melhorar a gestão, confiabilidade e	Visam melhorar a operação e a eficiência

	qualidade da energia elétrica no local do consumidor final	do sistema elétrico como um todo, em vez de apenas atender às necessidades de um consumidor final.
<b>Principais Usos</b>	<p>Armazenamento de energia para reduzir os custos de demanda de pico, evitando picos de consumo.</p> <p>Fornecer energia de reserva em caso de interrupções no fornecimento de eletricidade.</p> <p>Integração de fontes de energia renovável, como painéis solares ou turbinas eólicas, para aumentar o autoconsumo e reduzir a dependência da rede elétrica.</p>	<p>Armazenamento de energia em larga escala para estabilizar a rede elétrica e lidar com flutuações na geração de energia, como a intermitência das fontes renováveis.</p> <p>Postergar investimentos em infraestrutura, como a construção de novas linhas de transmissão ou subestações, ao fornecer energia nos momentos de pico.</p> <p>Fornecer serviços ancilares, como regulação de frequência (manter a estabilidade da frequência da rede) e black start (restabelecer o sistema após uma queda de energia).</p>

Dentre as aplicações baseadas em energia podemos destacar as seguintes:

#### A. Arbitragem de preços:

A arbitragem é um processo que consiste numa operação de compra e venda de um ativo visando o lucro sobre a diferença de preços do mesmo ativo em diferentes mercados [23]. No contexto do mercado elétrico envolve comprar e armazenar eletricidade quando os preços estão baixos e vendê-la quando os preços estão altos, aproveitando as diferenças de preço. Embora, geralmente, não seja lucrativa por si só, ela pode ser combinada com outras aplicações para empilhamento de valores.

#### B. Mudança de pico de geração renovável:

As fontes de energia renováveis têm por característica sua intermitência durante o dia. Os sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS) desempenham um papel fundamental, agindo como uma ponte que preenche a lacuna entre a natureza flutuante das energias renováveis e a procura constante de eletricidade. Permitindo armazenar o excedente de eletricidade quando a geração renovável é alta e liberá-lo nos horários de pico de demanda, otimizando o uso de recursos renováveis

#### C. Autoconsumo:

Consumidores que dispõem da geração de energia fotovoltaica tem por oportunidade utilizar os sistemas de baterias para aumentar o consumo advindo da geração solar. A energia gerada pelos painéis fotovoltaicos é usada para satisfazer a demanda da carga e o excedente é utilizado para carregar as baterias. Nos períodos de alto consumo e no horário

de ponta, essa energia armazenada é utilizada para fornecimento das residências [24]. A figura abaixo representa esta aplicação.

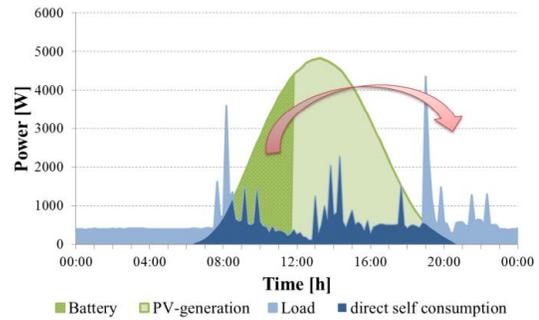


Figura 13 - Estratégia de gestão de baterias para maximizar o autoconsumo. [24]

#### Aplicações baseadas em potência:

#### D. Resposta de frequência primária:

O uso de sistemas de armazenamento de energia de bateria pode contribuir de maneira importante para manter a estabilidade de frequência em sistemas de energia. O BESS é capaz de responder rapidamente a perturbações, como o desligamento de geradores, fornecendo potência nominal em questão de milissegundos. Isso o torna um recurso valioso para lidar com desafios relacionados à redução da inércia e à estabilidade de frequência no sistema de energia [25].

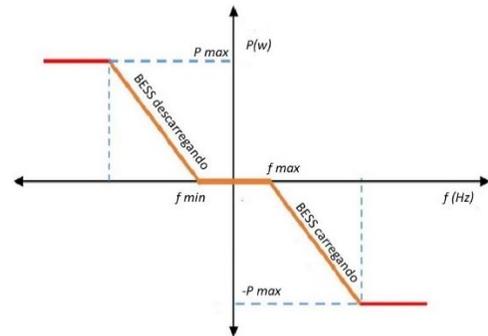


Figura 14 - Funcionamento BESS no controle de frequência

A figura a seguir resume as condições e faixas de operação da central geradora em regime de frequência não nominal.



Figura 15 - Faixa de operação em frequência [26]

#### E. Habilitar usinas elétricas mais lentas para resposta de frequência primária

Da mesma maneira que pode atuar na resposta do controle de frequência primária, o BESS tem sua aplicação em conjunto com fontes de energia, para as quais tem-se uma resposta lenta. O armazenamento de energia diminui esse tempo de atuação, habilitando o conjunto para atuar em aplicações que necessitem de rápida atuação. Como disposto na Figura 16, vemos o BESS

contribuído para diminuir o tempo de resposta para usinas térmicas.

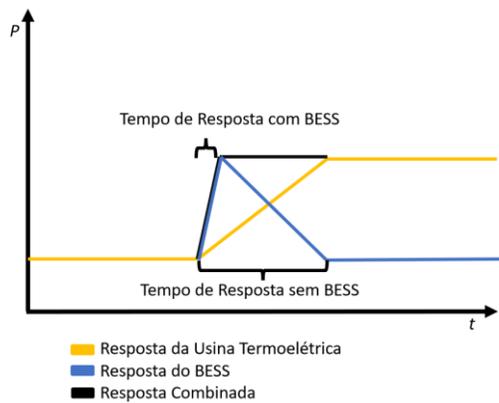


Figura 16 - Conjunto BESS e Usina Termoeletrica

#### F. Peak shaving para cargas

Consumidores que possuem contratos de demanda pagam tanto pela potência (relacionada à carga instalada) quanto pela energia consumida.

Os sistemas de armazenamento com baterias podem disponibilizar energia armazenada quando ocorrem solicitações de alta potência, reduzindo a energia necessária da rede e permitindo que a unidade consumidora permaneça dentro de seu limite de demanda contratada, mantendo os consumos dos equipamentos e suprindo internamente os picos de potência da instalação [27].

Sistemas de armazenamento de energia com baterias têm o potencial de reduzir a carga percebida pela concessionária, resultando em economias substanciais, especialmente quando os picos de carga excedem a demanda contratada, evitando assim multas para o consumidor devido ao excesso de demanda, como podemos observar na Figura 17.

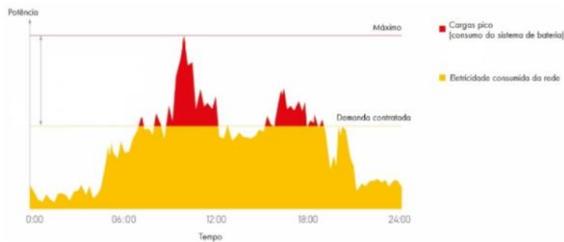


Figura 17 - Peak-Shaving da Carga [27].

#### IV. ESTUDO DE CASO COM ACESSO À REDE: DIMENSIONAMENTO DE BESS PARA DESLOCAMENTO DE CONSUMO NO HORÁRIO DE PONTA

Neste estudo de caso serão utilizados valores aproximados de uma situação real enfrentada por uma instituição de ensino, a qual tem o objetivo reduzir o consumo no horário de ponta.

Para o dimensionamento de um sistema de armazenamento de energia em bateria para atender o consumo de ponta, foi utilizado como base o consumo fornecido pela concessionária de energia, o qual foi dividido pelo número de dias úteis por

mês abordado. Assim podendo obter o valor médio do consumo no horário de ponta para a instalação.

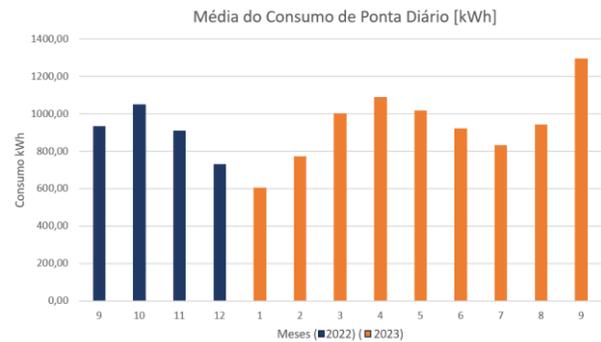


Figura 18- Gráfico do Consumo no Horário de Ponta

A partir deste levantamento é possível obter o valor médio de consumo de 931,49 kWh, o qual vai ser adotado como valor mínimo a ser entregue pelo BESS para mitigar o consumo no horário de ponta.

Para dimensionar a capacidade nominal é necessário fazer o levantamento da eficiência de descarga do conjunto de todos os componentes do BESS, ou seja, a multiplicação das eficiências das individuais de cada componente. Para este estudo utilizou-se os valores típicos para os equipamentos abaixo:

Eficiência Transformador	0,98
Eficiência Cabos CA	0,99
Eficiência Cabos CC	0,99
Eficiência PCS	0,98
Eficiência Total de Descarga	0,96

Como também é necessário considerar o DoD (Profundidade de Descarga), que é a porcentagem de carga retirada da bateria em um ciclo de descarga, neste caso será considerado 90%. Portanto para o levantamento a capacidade nominal do banco de baterias é necessário o cálculo do valor que supra todas essas perdas entregando no ponto de conexão das cargas a potência necessária, dessa forma temos que utilizar a seguinte equação:

$$C = \frac{\text{Necessidade de Entrega}}{\text{Eficiência Total de Descarga} \times \text{DoD}}$$

Logo sendo  $C$  a capacidade do banco de baterias, temos o valor de 1072 kWh, porém para atender este caso serão utilizados valores comerciais cotados junto aos fornecedores. Sendo assim será considerado um sistema BESS de 1376 kWh como necessário para atender o consumo no horário de ponta.

#### V. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO APLICAÇÕES SEM ACESSO À REDE

O Armazenamento de Energia em Baterias quando utilizados em situações sem acesso a rede, tem suas aplicações baseadas em energia. Este tem sua atuação em conjunto com fontes de energia variadas, sendo estas renováveis ou não, formando assim microrredes.

Microrredes são redes de geração distribuída que podem operar isoladamente do sistema elétrico, contendo uma ou mais

unidades geradoras distribuídas, normalmente de diferentes fontes [28].

Dentre as aplicações típicas podemos destacar o uso do BESS para o agronegócio e para atendimento dos Sistemas Isolados, em ambos os casos o armazenamento tem por objetivo substituir a atuação do grupo gerador diesel, parcialmente ou totalmente, e aumentar o uso de energias renováveis. Visto que o armazenamento é capaz de amenizar a intermitência provenientes de fontes de energia fotovoltaicas e eólicas.

Diante deste contexto, neste trabalho será abordado o caso dos Sistemas Isolados como fonte de estudo para possíveis aplicações do BESS, e possível contribuição na transição energética destes sistemas.

#### A. Sistemas Isolados no Brasil

Sistemas Isolados são aqueles que não estão conectados à rede nacional de transmissão (Sistema Interligado Nacional - SIN), seja por motivos técnicos ou econômicos. Os sistemas isolados são sistemas cuja operação é mais sensível, pois não existe um sistema integrado capaz de absorver oscilações de potência, se fazendo necessário um sistema robusto e confiável para o suprimento ininterrupto de energia para estas localidades buscar este conceito na ANEL [29]. Estes sistemas, conhecidos pela sigla SISOL, compreende 176 localidades, segundo o Plano Anual Da Operação Energética Dos Sistemas Isolados para 2023 divulgado pelo operador nacional do Sistema Elétrico Tradicionalmente, estes sistemas isolados são atendidos predominantemente por UTEs diesel. Os geradores diesel têm por características seu baixo custo de implantação o que torna atrativo para sua alocação durante o contrato de fornecimento. Entretanto, o uso desse combustível implica em impactos ambientais devido a emissão de gases do efeito estufa, como também atrapalham a qualidade de vida dos habitantes da região atendida devido ao elevado ruído presente em sua operação.

Outro ponto a ser considerado é a logística, como o combustível não é produzido na mesma localidade em que é utilizado, os sistemas dependem de uma complexa logística de abastecimento do combustível, especialmente na região amazônica, dependendo por vezes de modais diferentes (fluvial e rodoviário), estando sujeito às condições climáticas sazonais de cheias e secas dos rios. Por esta razão, em algumas localidades, há a necessidade de se armazenar combustível por longos períodos, podendo chegar até seis meses [30].

Estes fatores encarecem o fornecimento de óleo diesel, resultando em um custo elevado para a geração de energia. A equipe de operação e manutenção (O&M) necessária para o funcionamento destas UTEs também é um custo fixo elevado que encarece esta fonte de energia [29].

Os sistemas isolados no Brasil são predominantes concentrados na região norte do país, compreendendo os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia e Roraima, além da ilha de Fernando de Noronha, pertencente ao estado de Pernambuco



Figura 19- Distribuição Geográfica dos Sistemas Isolados – Horizonte 2023 [31]

## VI. ESTUDO DE CASO SEM ACESSO À REDE: TRANSIÇÃO ENERGÉTICA EM SISTEMAS ISOLADOS

### A. Viabilidade de Fontes De Energia Renovável Para Sistemas Isolados

A inserção de fontes renováveis deve ser analisada considerando as condições locais e o potencial de implementação. Desta forma o presente estudo baseou-se em considerar a análise das fontes renováveis: Eólica, Biomassa e Solar.

#### a) Fonte Eólica

O potencial eólico do Brasil está predominantemente ligado às regiões nordeste, sul e sudeste. Entretanto a grande parte dos sistemas isolados está presente na região norte, como mostrado anteriormente, e seguindo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro temos a análise da figura abaixo onde as velocidades dos ventos na região se mostram pouco relevantes.

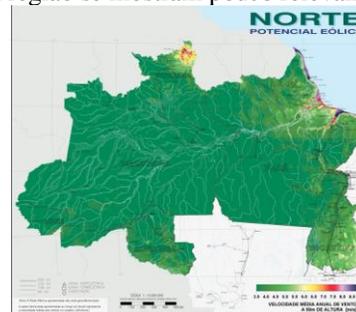


Figura 20- Potencial Eólico Região Norte [32].

A Consultoria Para Identificação Modelos Técnicos e Econômicos De Integração Renovável disponível no site do EPE combinou a localização das usinas eólicas em funcionamento no Brasil, de acordo o *WebMap* EPE, sobrepondo esses dados ao Atlas Eólico Brasileiro, que apresenta o recurso eólico médio para o território nacional [32] resultando na figura abaixo. Onde podemos perceber que os aerogeradores no Brasil estão instalados em regiões com velocidade média anual de ventos maior que 6,5 m/s, condição quase inexistente no contexto amazônico.

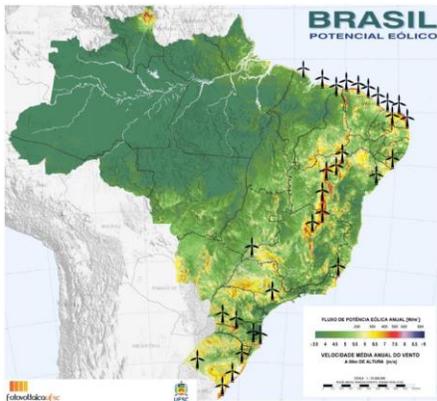


Figura 21- Potencial Eólico Brasileiro [29]

Além da escassez de vento na região em questão, a energia eólica é uma fonte de energia que varia intermitentemente. Para sua aplicação em sistemas isolados, é necessário examinar estratégias para reduzir os efeitos de instabilidades na minirrede causadas por mudanças súbitas na geração de energia renovável. Normalmente, para realizar essa mitigação, são empregados aerogeradores com controle de ângulo das pás (*pitch control*). No entanto, é importante observar que esses aerogeradores geralmente têm um porte médio, com uma potência nominal que varia de centenas a milhares de quilowatts, e eles vêm equipados com torres altas e pás de grande envergadura.

Devido às dificuldades logísticas encontradas na região amazônica, sendo muitas das comunidades do SISOL localizadas em meio a florestas onde o transporte fluvial a única alternativa, o uso de aerogeradores de médio porte com pitch control encontra diversos obstáculos e elevados custos para o transporte e instalação destes componentes [29]

#### b) Biomassa

Segundo o relatório da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) de 2008, a biomassa emerge como uma das fontes de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Ela é amplamente reconhecida como uma das principais alternativas para diversificar a matriz energética e, por conseguinte, reduzir a dependência dos combustíveis fósseis. Os usos mais frequentes da biomassa como fonte de energia englobam a produção de calor, eletricidade, cocção e combustíveis.

Do ponto de vista energético a biomassa é toda matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia. O SISOL, tem sua grande parte composta por UTEs dispostas na região amazônica, o que torna atrativa a utilização de resíduos do processo de extração e corte de madeira como princípio ativo da produção de biomassa.

Porém as concessões de produção de energia elétrica no SISOL através de biomassa possuem usinas com aproximadamente 10 MW de potência outorgada, sendo que apenas 8% das localidades do SISOL possuem carga superior a 5 MWmed anual e apenas 2% possuem carga superior a 10 MWmed. A UTE Itacoatiara (9 MW biomassa cavaco/resíduo de madeira, em operação desde 2002), que opera no município

de mesmo nome no estado do Amazonas, representa talvez o exemplo mais ideal (e ao mesmo tempo único) de utilização de fonte renovável de energia na Amazônia. Utilizando rejeitos da empresa Mil Madeireira Itacoatiara Ltda. em um contrato de fornecimento de biomassa de 25 anos, a usina começou a operar em 2002 atendendo a cerca de 70% da carga de Itacoatiara, com os restantes 30% sob responsabilidade da Amazonas Energia em geração diesel [29].

A utilização da biomassa depende de longos contratos de fornecimento, como também está diretamente afetada pela variação da produção, além de ser necessário a compatibilidade da demanda da comunidade com a produção de energia através dessa fonte. Além disso, é necessário observar que outros fatores como a localização da comunidade junto à empresa de exploração de madeira e garantia de um manejo certificado ambientalmente.

Assim, considerando o potencial limitado de utilização da biomassa como fonte de geração de energia, esta fonte não será abordada como prioritária neste estudo para promover uma maior penetração das fontes renováveis no Sistema de Operação Integrada de Sistemas Elétricos (SISOL).

#### c) Fonte Fotovoltaica

O Brasil possui grande potencial para geração solar, segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, a região nordeste é o local com a maior irradiação solar média anual. Porém, a região norte ainda possui recurso solar em abundância, com valores de irradiação global horizontal diária anual de cerca de 4,6 kWh/m<sup>2</sup>/dia, cerca de 15% inferior às médias encontradas na região nordeste. A Figura 22 apresenta a média anual do total diário de irradiação global horizontal para o território brasileiro.

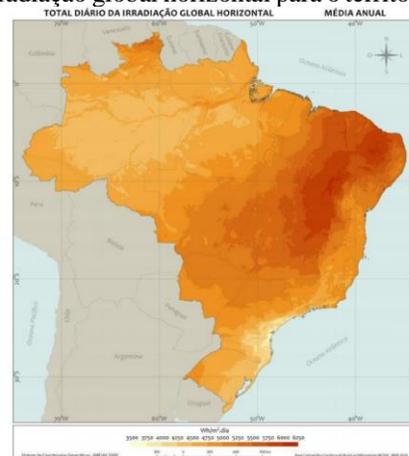


Figura 22- Atlas brasileiro de energia solar [33].

Outro ponto importante a ser analisado é a facilidade de implementação, das soluções compostas por painéis fotovoltaicos. Devido sua natureza modular, estes garantem uma logística facilitada quando comprada às outras alternativas anteriormente citadas, além de propiciar uma implantação descentralizada.

## B. Sistema Híbrido Off-grid

Diante do contexto apresentado até este momento podemos concluir que o sistema off-grid que se mostra viável na transição energética do sistema isolado brasileiro é composto pelo grupo geradores diesel, sistema fotovoltaico e sistema de armazenamento de energia.

### a) Grupo Gerador Diesel

O grupo gerador diesel tem seu funcionamento baseado em três etapas. Primeiramente ocorre a queima do combustível, chamado do processo de ignição do motor, onde o ar é admitido e comprimido, seguida da injeção do diesel e sua explosão e por último o escape dos gases liberados na queima.

Em seguida ocorre a troca de energia, com a queima do combustível, o eixo central do gerador é movimentado, produzindo energia mecânica. Com isso, o alternador do equipamento consegue transformá-la em energia elétrica. Por último, temos o processo de abastecimento. Essa etapa envolve o requisito mínimo para que o gerador continue funcionando: o combustível [34].

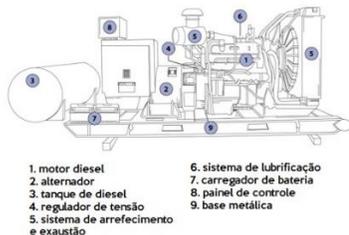


Figura 23- Motor Diesel [35].

Operar um motor a diesel em locais remotos estabelece uma dependência no fornecimento de combustível, serviços e peças de reposição. Portanto, um projeto adequado visa minimizar as horas de operação ao necessário. O tamanho do conjunto gerador deve ser cuidadosamente calculado para abranger toda a potência instalada e ser capaz de suportar as cargas transitórias dos motores elétricos existentes. No entanto, deve-se evitar o excesso de dimensionamento, pois os motores a diesel funcionam de maneira mais eficiente quando devidamente carregados.

Os fabricantes recomendam que os motores a diesel operem entre 50% e 85% de sua capacidade nominal. Se eles operarem com menos de 30% de carga por períodos prolongados, ocorrerá o que é chamado de "sobrecarga" e "empilhamento úmido", nos quais depósitos de combustível não queimado se formam em várias partes do motor, causando baixo desempenho e desgaste acelerado. Se o motor for operado com carga reduzida por um tempo, ele precisará funcionar com carga máxima com frequência para queimar todos esses depósitos [36].

### b) Sistema Fotovoltaico

A eletricidade pode ser produzida por células fotovoltaicas (FV) a partir da luz solar. A quantidade de energia gerada pelas células fotovoltaicas depende da disponibilidade da luz e de, onde sua eficiência de conversão das células fotovoltaicas

depende principalmente da porcentagem de inclinação da luz solar em direção às células. Estas células são conectadas em série para criar uma corrente alta e em paralelo para gerar uma alta tensão [37].

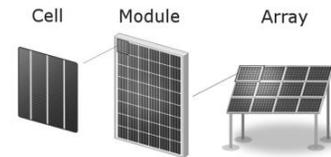


Figura 24- Conexões das células fotovoltaicas [37]

É possível estimar o potencial de energia solar consultando mapas de radiação solar fornecidos por agências locais ou internacionais ou, mais precisamente, medindo a radiação global in situ ou por meio de imagens de satélite. O componente mais importante corresponde à radiação direta, que é recebida do sol em linha reta, sem difusão na atmosfera. Em condições ideais, por exemplo, sem nuvens no céu e máxima exposição solar, a radiação total ao nível do solo pode chegar a quase 1000 W/m<sup>2</sup>, conhecida como radiação de base.

Outros parâmetros que devem ser considerados para a instalação fotovoltaica incluem:

- Temperatura;
- Vento;
- Sujeira ou poluição;
- Umidade relativa e salinidade do ambiente;
- Interferência de sombra;
- Distância para controles e cargas;
- Alinhamento manual ou automático [38].

### c) Otimização Simulação do Sistema Off-Grid

A função primordial de um sistema híbrido off-grid de geração de energia elétrica é sua confiabilidade. No fornecimento de energia, a otimização desempenha um papel importante, garantindo a viabilidade do mesmo. Assim como, minimizando o investimento inicial, os custos operacionais e os impactos ambientais, enquanto maximiza a consistência, qualidade e eficiência da energia gerada.

A complexidade inerente ao design de sistemas híbridos e a variabilidade dos fatores de dimensionamento que afetam a geração de energia nestes sistemas tornam as ferramentas de simulação essenciais para a análise de sistemas híbridos.

Diante desta situação o presente estudo terá o uso do *software* HOMER como sua principal ferramenta de otimização. Esta ferramenta auxilia na previsão da configuração de sistemas elétricos e pode combinar sistemas convencionais com os mais recentes componentes híbridos, como energia solar fotovoltaica, energia eólica, motores a gasolina/diesel, biocombustíveis, microturbinas, pequenas hidrelétricas, termoeletricas, sistemas de células a combustível e bancos de armazenamento de baterias [39].

Para a simulação foram adotados os seguintes passos para estruturar o caminho a ser abordado na construção do sistema a ser simulado, como é mostrado na Figura 25.



Figura 25 - Fluxograma adotado para simulação.

Para tal foi utilizada como base a cidade de Izidolândia em Rondônia. Que tem seus dados disponibilizados junto aos arquivos do segundo leilão de Sistemas Isolados no Anexo Lote IV-Rondônia. Esta cidade é suprida por uma unidade geradora termoeétrica denominada UTE Izidolândia, a qual é composta por dois geradores Diesel de 168,75 kW.

Através deste arquivo é possível ter acesso ao consumo horário atendido pela UTE do local e assim montar um perfil de carga a ser atendido. Com auxílio do *software* HOMER podemos montar um mapa perfil na forma um mapa de calor.

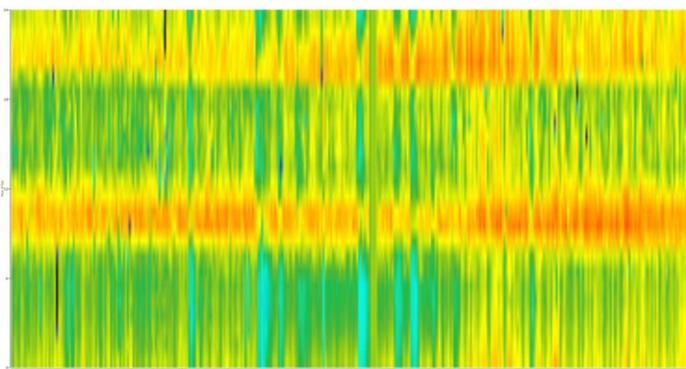


Figura 26 - Perfil anual Izidolândia.

Para a análise de viabilidade é necessário a inserção de parâmetros econômicos no *software*. Neste estudo foram utilizados valores adotados por pesquisas anteriores juntamente com novos levantamentos.

- CAPEX Sistema FV: R\$ 4.000,0 /kWp [40]
- OPEX Sistema FV: 2% do CAPEX /ano [29]
- CAPEX Sistema de Armazenamento: R\$ 2.500 /kWh (Cotado com Fornecedor)
- OPEX Sistema de Armazenamento: 1% do CAPEX /ano (Cotado com fornecedor)
- CAPEX Diesel: R\$ 1.000,00 /kW [40]
- OPEX Fixo: 5% do CAPEX
- OPEX Variável Diesel: R\$ 25,00 /MWh
- Custo do Diesel: R\$ 6,64 /L [41]
- Taxa de desconto nominal ou TMA: 8% a.a.
- Taxa de inflação esperada: 4,25% a.a.

Para esta simulação foram utilizados modelos genéricos disponibilizados pelo HOMER, como também foi adotado um período de 15 anos para análise do sistema. O esquemático do sistema simulado se encontra abaixo:

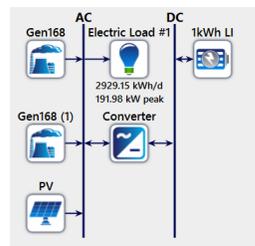


Figura 27- Sistema simulado.

Para uma análise próxima da realidade, foi considerado para a análise dos resultados sistemas com no máximo 8 horas de autonomia das baterias, visto que não sabemos o espaço disponível para implementação do sistema.

Os resultados são calculados baseados no LCOE (Custo Nivelado de Produção de energia) valor referente à R\$/kWh, e no NPC (Custo Presente Líquido) dado em R\$. No Anexo B é abordado o funcionamento do HOMER Pro e o cálculo dos valores de LCOE e NPC.

Como resultado da simulação proposta, em comparação ao modelo base de somente dois geradores diesel, temos:

	Architecture				Cost		
	PV (kW)	Gen168 (kW)	Gen168 (1) (kW)	1kWh LI (kWh)	Converter (kW)	NPC (R\$)	CAPEX (R\$)
Base system		169	169			R\$30.8M	R\$337.500
Proposed system	977	169	169	1.221	442	R\$20.6M	R\$7.30M

Figura 28- Resultado do modelo proposto.

No qual é usado um sistema de baterias com autonomia de oito horas e capacidade nominal de 1,221 kWh. Com uma penetração de 133% de energia fotovoltaica. Dessa forma reduzindo o uso de geradores a diesel. Na imagem a seguir mostra o comportamento do sistema para uma parte de um ano simulado.

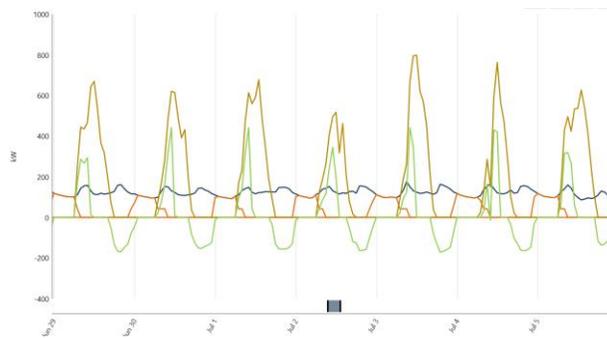


Figura 29-Comportamento das Fontes.

	Fonte Fotovoltaica
	BESS
	GGD
	Carga Atendida

## VII. CONCLUSÃO

Diante do exposto neste trabalho de levantamento de aplicações, podemos perceber o impacto do Armazenamento

de Energia em Baterias no setor energético brasileiro. O qual pode contribuir para aplicações na geração, transmissão e distribuição. Logo sendo de grande importância massificar o conhecimento sobre esta tecnologia.

O levantamento dos itens componentes do BESS, contribuiu para entender seu funcionamento geral, e assim conseguir discernir como este se difere de outros meios de armazenamento de energia. O qual utiliza equipamentos visando converter energia elétrica em energia eletroquímica e vice-versa, de forma segura e com o mínimo de distorções a rede.

Assim como entender as aplicações conectadas à rede nos trazem o discernimento de como utilizar o BESS, o qual serve como um grande gestor de potência e energia. Como também, é possível perceber que seu dimensionamento é baseado nas informações da necessidade da aplicação e na eficiência dos componentes do sistema.

Por fim, o BESS no contexto isolado é uma grande alternativa para substituição de grupo geradores diesel, dessa forma contribuído para a transição energética em busca da zero emissão de carbono. A simulação para cidade de Izidolândia mostrou a viabilidade do armazenamento de energia em baterias, o qual através de usinas fotovoltaicas superdimensionadas, buscando atender a carga e o carregamento das baterias é possível reduzir o consumo de combustíveis fósseis. Além disso, o investimento para um período de 15 anos mostra-se mais atrativo financeiramente do que o investimento na situação convencional adotada através de geradores.

#### REFERÊNCIAS

- [1] ONU. **Mundo pode atingir neutralidade em carbono até 2050**. 19 set. 2022. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2022/09/1801311>. Acesso em: 15 nov. 2023.
- [2] SERRA, Eduardo T. et al. **Armazenamento de Energia: Situação Atual, Perspectivas E Recomendações**. Comitê de Energia Da Academia Nacional de Engenharia, 2016.
- [3] Battery and Energy Technologies. Disponível em: [https://www.mpoweruk.com/grid\\_storage.htm](https://www.mpoweruk.com/grid_storage.htm). Acesso em: 16 nov. 2023.
- [4] FATHIMA, Amjed Hina; PALANISAMY, Kaliannan. **Renewable systems and energy storages for hybrid systems**, Editor(s): A. Hina Fathima, N. Prabaharan, K. Palanisamy, Akhtar Kalam, Saad Mekhilef, Jackson. J. Justo, In Woodhead Publishing Series in Energy, Hybrid-Renewable Energy Systems in Microgrids, Woodhead Publishing, 2018, Pages 147-164.
- [5] Battery Energy Storage System Market - BESS - **Size, Share, Industry Analysis**. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/battery-energy-storage-system-market>. Acesso em: 16 nov. 2023.
- [6] GOLDIE-SCOT, Logan. **A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices | BloombergNEF**. 5 mar. 2019. Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>. Acesso em: 16 nov. 2023.
- [7] MORAIS FILHO, Sérgio Augusto de. **Métodos para Alocação de Sistemas de Armazenamento de Energia em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Carlos, 2020.
- [8] FREITAS, D. C. C. et al. **Battery charger lead-acid using IC BQ2031**. IEEE Latin America Transactions, v. 14, p. 32–37, 2016.
- [9] ROSOLEM, Maria de Fátima N. C.; PINTO, Daniel Robson; BECK, Raul F. **Estado da Arte de Baterias Avançadas para Sistemas Fotovoltaicos**. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte, 2016.
- [10] ZHANG, Ruifeng; XIA, Bizhong; LI, Baohua; CAO, Libo; LAI, Yongzhi; ZHENG, Weiwei; WANG, Huawen; WANG, Wei. **State of the Art of Lithium-Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles**. Energies, v. 11, n. 7, 2018. ISSN 1996-1073.
- [11] TAYLOR, P. BOLTON, R. STONE, D. XIAO-PING Z. MARTIN, C. UPHAM, P. **Pathways for energy storage in the UK**, The Centre for Low Carbon Futures, 2012.
- [12] BASÍLIO, Pedro Miguel Seródio e Seródio. **Desenvolvimento de um Conversor CC-CC Bidirecional Interleaved para Testes de Baterias de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO4)**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho, março de 2018.
- [13] STA Eletrônica. **Comparação entre as Baterias de Lítio Íon**. Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-litio/comparacao-entre-as-baterias-de-litio-ion>. Acesso em: 2023.
- [14] WICKERTS, S., ARVIDSSON, R., NORDELÖF, A., SVANSTRÖM, M., & JOHANSSON, P. **Prospective Life Cycle Assessment of Lithium-Sulfur Batteries for Stationary Energy Storage**. ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2023. DOI: 10.1021/acssuschemeng.3c00141.
- [15] ABB Group. **2 MW PCS Unit for BESS Applications**. Datasheet. Ano de Publicação: 2023.
- [16] ZECCHINO, A. YUAN, Z. SOSSAN, F. CHERKAOUI, R. PAOLONE, M. **Optimal provision of concurrent primary frequency and local voltage control from a BESS considering variable capability curves: Modelling and experimental assessment**, Electric Power Systems Research, Volume 190, 2021, 106643, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106643>.
- [17] CONTI, S. et al. **Optimal Dispatching of Distributed Generators and Storage Systems for MV Islanded Microgrids**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 27, n. 3, p. 1243–1251, jul. 2012.
- [18] CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- [19] SOLOVEV, Andrei; PETROVA, Ana. **Designing a BMS (Battery Management System) for a Stationary Battery Storage Solution**. Integra Sources. Disponível em: <https://www.integrasources.com/blog/bms-battery-management-system-battery-storage-solution/>. Acesso em: 25 de setembro de 2023.
- [20] DAOWD, Mohamed; ANTOINE, Mailier; OMAR, Noshin; LATAIRE, Philippe; VAN DEN BOSSCHE, Peter; VAN MIERLO, Joeri. **Battery Management System—Balancing Modularization Based on a Single Switched Capacitor and Bi-Directional DC/DC Converter with the Auxiliary Battery**. Energies, v. 7, n. 5, p. 2897–2937, 2014. ISSN 1996-1073.
- [21] INACCESS. **The BESS Ecosystem**. Inaccess. 9 de dezembro de 2021. Disponível em: <https://www.inaccess.com/blog/battery-energy-storage-ecosystem>. Acesso em: 25 de setembro de 2023.
- [22] Campos, F. M., Araújo, D. N., Toledo, O. M., Fernandes, L. E. S., & Borba, A. T. A. (2022). **Tecnologias e Aplicações de Sistemas de Armazenamento de Energia Para Suporte à Integração De Fontes Renováveis no Brasil**. In IX Congresso Brasileiro de Energia Solar, Florianópolis, 23 a 27 de maio de 2022.
- [23] REIS, Tiago. **Arbitragem: entenda como lucrar com as diferenças de preços**. SUNO, [S. l.], 11 jul. 2022. Disponível em: <https://www.suno.com.br/artigos/o-que-e-arbitragem/>. Acesso em: 5 nov. 2023.
- [24] Janina Struth, Matthias Leuthold, Astrid Aretz, and M Bost. **PV-Benefit: a critical review of the effect of grid integrated PV-storage-systems**. 8th International Renewable Energy Storage. Conference and Exhibition, (January 2015):1– 10, 2013.
- [25] WOO YEONG CHOI; KYUNG SOO KOOK; YOO, H.-J. **Effect Quantification of BESS Providing Frequency Response on Penetration Limit of VER in Power Systems**. Energies, v. 15, n. 24, p. 9380–9380, 11 dez. 2022.
- [26] ONS; Submódulo 2.10, **Requisitos Técnicos Para Conexão às Instalações de Transmissão**, p 21, 03 de outubro de 2022.

- [27] Bueno, M. Torres, R. **Peak-Shaving: reduzindo picos de demanda com sistemas de armazenamento**. Canal Solar. 11 de setembro de 2020. disponível: <https://canalsolar.com.br/peak-shaving-reduzindo-picos-de-demanda-com-sistemas-de-armazenamento/>. Acesso: 05 de novembro de 2023
- [28] Soares, R.M. Oliveira, M.E de. **Microrredes: o conceito através da história, incentivos e o mercado brasileiro**, Itumbiara, Goiás, 2022
- [29] SANTOS, D. O. DOS. **Consultoria Para Identificação Modelos Técnicos E Econômicos de Integração Renovável em Sistemas Isolados**. EPE: IEES, 2021.
- [30] PONTE, G. P. DA. **Geração de energia elétrica em Sistemas Isolados: desafios e propostas para aumento da participação de fontes renováveis com base em uma análise multicritérios**. Dissertação de Mestrado—PUC- RJ: [s.n.]. 2019.
- [31] ONS. PEN SISOL 2023. Plano anual da operação energética dos Sistemas Isolados para 2023. 20022.
- [32] ODILON A. CAMARGO DO AMARANTE. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Ministério de Minas Energia, p. 44, 2001.
- [33] PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., GONÇALVES, A. R., COSTA, R. S., LIMA, F. J. L., RÜTHER, R., ABREU, S. L., TIEPOLO, G. M., PEREIRA, S. V., SOUZA, J. G., 2017. **Atlas Brasileiro de Energia Solar Segunda Edição. Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE)**. (São José dos Campos – Brasil). 2017. Disponível em: <http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE> .Acessado em: 18, nov. 2023.
- [34] ARMAC. **Gerador a Diesel**. Disponível em: <https://armac.com.br/blog/maquina/gerador-a-diesel/>. Acesso em: 29/09/23.
- [35] ALUGAGERA. **Como funciona um gerador de energia**. Disponível em: <https://alugagera.com.br/noticias/como-funciona-gerador-energia>>. Acesso em: 29/09/23.
- [36] CANZIANI, F., MELGAREJO, Ó. **Design and Implementation of Rural Microgrids**. In: **Zambroni de Souza, A., Castilla, M. (eds) Microgrids Design and Implementation**. Springer, Cham. 2019
- [37] PADMANABAN, Sanjeevikumar; NITHIYANANTHAN, K; KARTHIKEYAN, S. Prabhakar; HOLM-NIELSEN, Jens Bo. **Microgrids**. 1. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2021.
- [38] CANZIANI, F., MELGAREJO, Ó. **Design and Implementation of Rural Microgrids**. In: **Zambroni de Souza, A., Castilla, M. (eds) Microgrids Design and Implementation**. Springer, Cham. 2019
- [39] BALACHANDER, K. AMUDHA, A. RAMALINGAM, S. P. **Renewable Energy Sources. (eds) Microgrids**. CRC Press, India. 2021.
- [40] EPE. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031: Micro e Minigeração Distribuída & Baterias. [S. l. : s. n.]. 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sitespt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico591/Caderno\\_MMGD\\_Baterias\\_rev2022.pdf](https://www.epe.gov.br/sitespt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico591/Caderno_MMGD_Baterias_rev2022.pdf). Acesso em 12 de dezembro de 2023
- [41] ANP. Levantamento de Preço de Combustíveis, 10 de dezembro de 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/levantamento-de-precos-de-combustiveis-ultimas-semanas-pesquisadas>. Acesso: 2 de dezembro de 2023.

## ANEXO A

Neste anexo é descrito conceitos e padrões abordados no trabalho.

*SoH (State of Health)*, o Estado de Saúde capacidade que a bateria tem de fornecer a corrente especificada quando solicitada em relação a capacidade nominal,

$$SoH = \frac{\textit{Capacidade de armazenamento medida}}{\textit{Capacidade de armazenamento nominal}}$$

*SoC (State of Charge)*, Estado de Carga indica a energia acumulada em um dado momento, em relação a sua carga total.

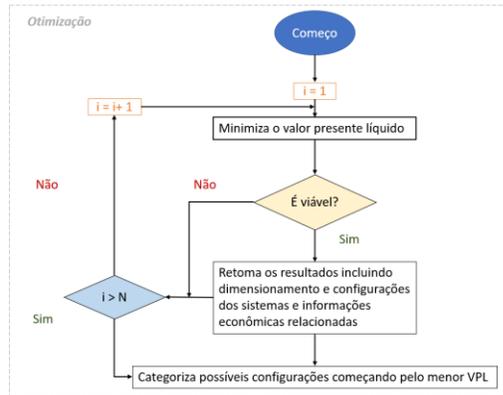
$$SoC = \frac{\textit{Carga disponível}}{\textit{Carga totalmente carregada}}$$

*DoD (Depth of discharge)*, Profundidade de Descarga, definido como uma quantidade de carga removida da bateria em um determinado estado relacionada à quantidade total de carga que pode ser armazenada nesta bateria

$$DoD = \frac{\textit{Capacidade de carga entregue}}{\textit{Capacidade de armazenamento disponível}}$$

## ANEXO B

HOMER é um *software* que auxilia na simulação de um modelo de microrrede, o qual realiza um processo de simulação para determinar o custo do ciclo de vida e a viabilidade técnica do modelo. Durante o processo de análise de sensibilidade, o HOMER realiza múltiplas otimizações para acessar os efeitos da incerteza ou mudanças nos componentes de dimensionamento, dados de entrada meteorológicos estáveis, como velocidade do vento ou irradiância solar, e preços de combustível. O processo de otimização utilizado pode ser resumido pelo fluxograma abaixo:



O Homer utiliza alguns conceitos para seu processo de análise:

*Custo de Capital* : refere-se ao custo desembolsado para o compra inicial dos equipamento.

*Custo O&M*: Custo relacionado a operação e manutenção dos equipamento.

*Custo de Substituição*: Custo para troca do equipamento

$$Custo\ Total = Custo\ de\ Capital + Custo\ de\ O\&M + Custo\ de\ Substituição$$

*Taxa de Deconto Real*: Usada para converter entre custos únicos e custos anualizados. O HOMER calcula a taxa de desconto real anual (também chamada de taxa de juros real ou taxa de juros) a partir das entradas "Taxa de desconto nominal" e "Taxa de inflação esperada". O HOMER utiliza a taxa de desconto real para calcular os fatores de desconto e os custos anualizados a partir dos custos presentes líquidos.

$$i = \frac{i' - f}{1 + f}$$

$i$  = taxa de desconto real

$i'$  = taxa de desconto nominal

$f$  = taxa de inflação esperada

*Fator de Recuperação de Capital*: Índice usado para calcular o valor presente de uma anuidade (uma série de fluxos de caixa anuais iguais).

$$FRC = \frac{I_r * (1 + I_r)^N}{(1 + I_r)^N - 1}$$

$i$  = taxa de desconto real

$N$  = número de anos

*Valor Presente Líquido*: VPL de um componente é o valor presente de todos os custos de instalação e operação do componente durante a vida do projeto, menos o valor presente de todas as receitas que ele obtém durante a vida do projeto. O HOMER calcula o custo presente líquido de cada componente do sistema e do sistema como um todo.

$$VPL = \frac{CT}{FRC(i, n)}$$

*LCOE*: custo nivelado de energia é o custo médio por kWh de energia elétrica útil produzida pelo sistema.

$$LCOE = \frac{VPL}{E_{ij}(\text{Energia gerada durante o tempo de vida do projeto})}$$