

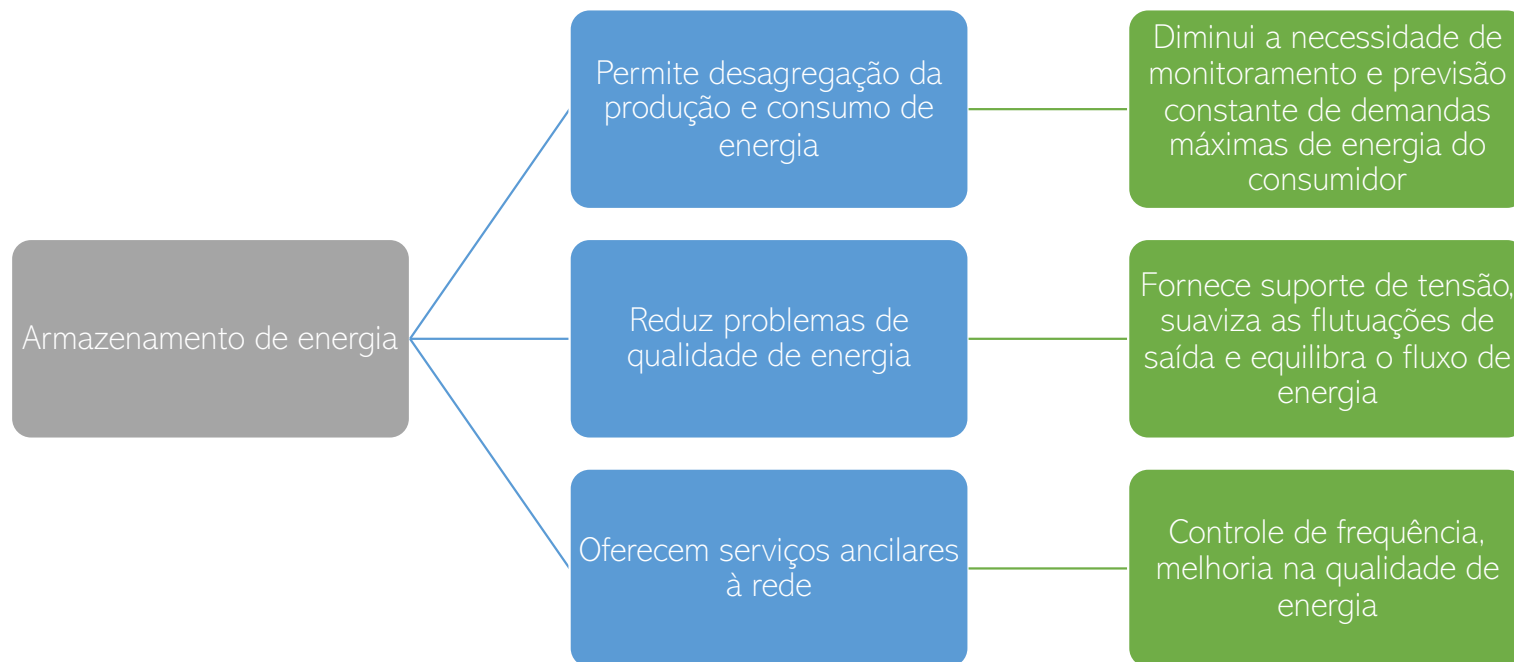


Flexibilidade, armazenagem e participação da procura

Thereza Cristina Nogueira de Aquino

Introdução

- Aumento da inserção de recursos energéticos renováveis variáveis e não controláveis à rede elétrica.
- Tecnologias de armazenamento como meio de mitigar o problema da intermitência das renováveis, se posicionando como um recurso fundamental para os requisitos de capacidade e flexibilidade.



Introdução

- Existem diferentes tecnologias de armazenamento de energia, desde baterias de íons de lítio até sistemas de armazenamento de energia térmica, hidrogênio ou usinas hidrelétricas reversíveis.
- Cada tecnologia tem suas próprias características, como desempenho, ciclo de vida, custo e aplicação ideal.

Tecnologia SAE

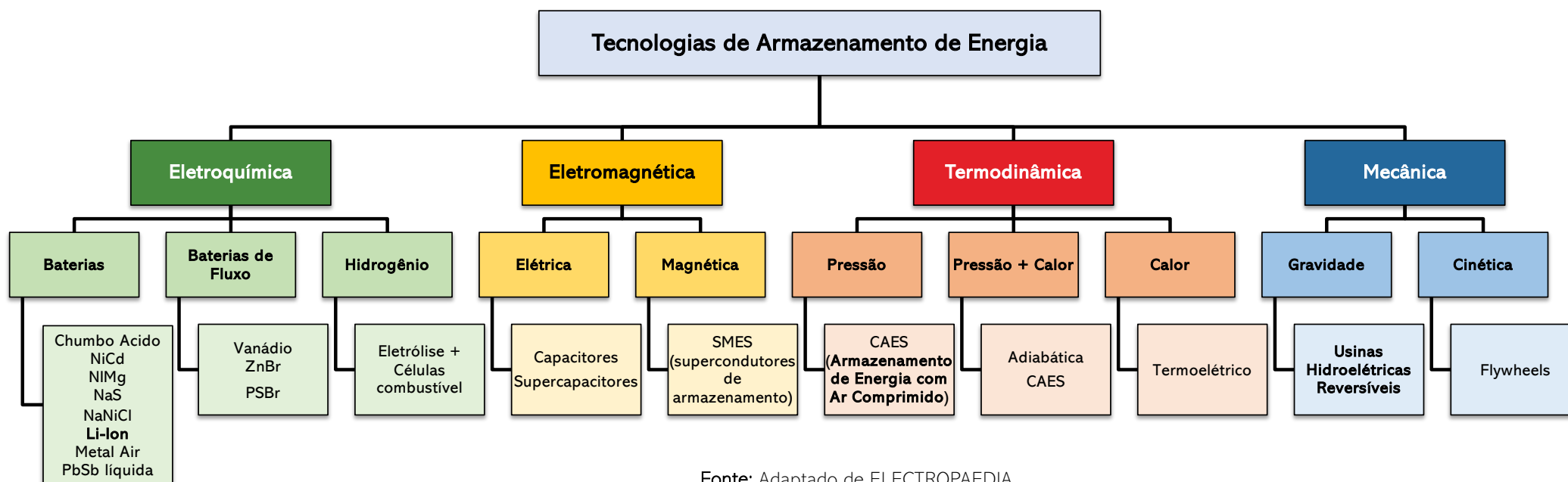
Visão geral dos tipos de tecnologias de armazenamento

Vantagens

Desvantagens

Tecnologias de Armazenamento de Energia

Classificação das tecnologias de armazenamento de energia



Fonte: Adaptado de ELECTROPAEDIA,
2023

Tecnologias de armazenamento de energia elétrica

Armazenamento Mecânico – Usinas Hidrelétricas Reversíveis

Representação do armazenamento de energia por usinas hidrelétricas reversíveis

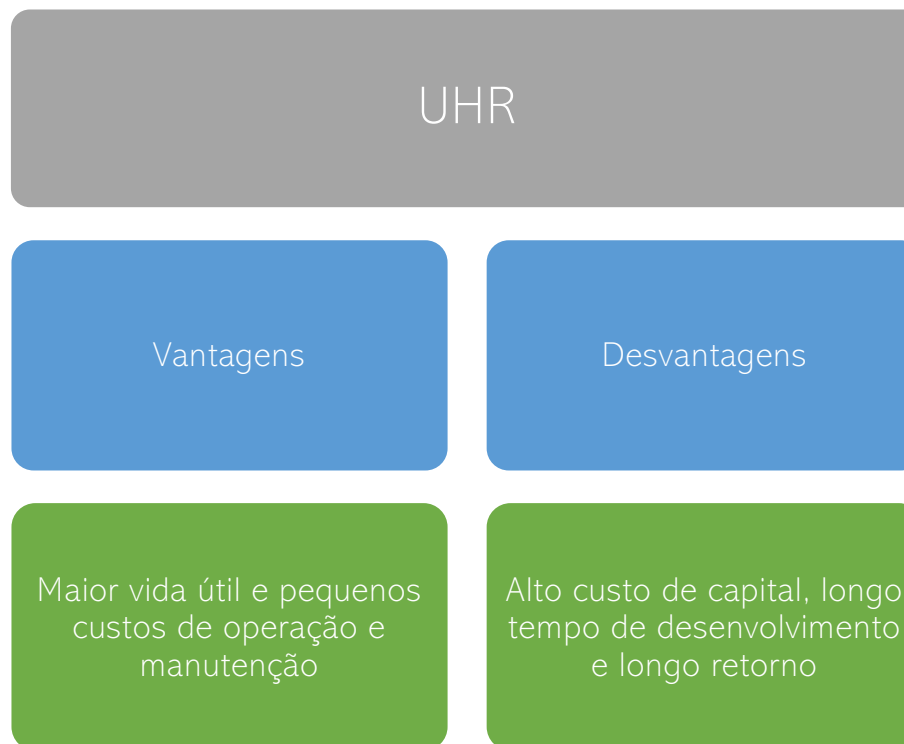


Fonte: (ANEKE; WANG, 2016)

Tecnologias de armazenamento de energia



Armazenamento Mecânico – Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR)



Tecnologias de armazenamento de energia

Armazenamento Mecânico – Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR)

Classificação das UHRs

Regime da água

Ciclo Fechado: Consiste no tipo de usina que possui dois reservatórios com diferenças de altura, sem que nenhum dos reservatórios sejam conectados a outra fonte de água;

Ciclo semi aberto: Este tipo de usina consiste na utilização de um lago, rio ou mar como um reservatório e o outro utiliza-se um reservatório artificial ou modificado que contenha um fluxo contínuo de água;

Ciclo Aberto: Esta usina consiste no fluxo de água fluindo continuamente através das bacias superior e inferior.

Potência

Classificação	Capacidade
Micro	Entre 1 e 100 kW
Mini	Entre 100 kW e 1 MW
Pequena	Entre 1 MW e 10/30 MW
Grande	Maior que 10 MW ou 30 MW

Fonte: Hussain et al. (2020)

Tecnologias de armazenamento de energia

Tipos de UHRs para atender as demandas de energia.

Tipos de UHR	Tipo de Operação	Descrição das Operações
Plurianual	Bombeamento	- Excedente anual em geração hidrelétrica - Preços anuais de combustíveis mais baratos que a média - Menor demanda média anual de energia - Excedente anual de disponibilidade hídrica - Baixa demanda hídrica anual
	Geração	- Déficit anual na geração hidrelétrica - Preços anuais de combustível mais caros que a média - Maior demanda anual de energia - Déficit anual de disponibilidade hídrica - Alta demanda hídrica anual
Sazonal	Bombeamento	- Estações chuvosas com alta geração de energia hidrelétrica - Verão com alta geração de energia solar - Estações de vento com alta geração de energia eólica - Época em que a demanda por energia aumenta
	Geração	- Período seco com baixa geração de energia hidrelétrica - Inverno com baixa geração de energia solar - Estações com baixa geração de energia eólica - Época em que a demanda por energia aumenta
Semanal/Mensal	Bombeamento	- Nos fins de semana, quando a demanda de energia diminui - Dias de vento com alta geração de energia eólica - Dias de sol com alta geração de energia solar - Semana ou mês com chuvas intensas
	Geração	- Durante a semana, quando a demanda de energia aumenta - Dias com baixa geração de energia eólica - Dias nublados com baixa geração de energia solar - Semana ou mês com baixa disponibilidade hídrica
Diária	Bombeamento	- Noite, quando a demanda de energia diminui - Dia, quando há geração de energia solar
	Geração	- Dia, quando a demanda por energia aumenta - Noite, quando não há geração de energia solar
		Fonte: CASTRO, 2018

Tecnologias de armazenamento de energia

Armazenamento Termodinâmico

Armazenamento termodinâmico

Pressão

Calor

Utilizam compressão de gases ou líquidos para armazenar energia

Utiliza materiais com alta capacidade térmica para armazenar energia térmica

Tecnologias de armazenamento de energia

Armazenamento Termodinâmico – Pressão – Ar comprimido

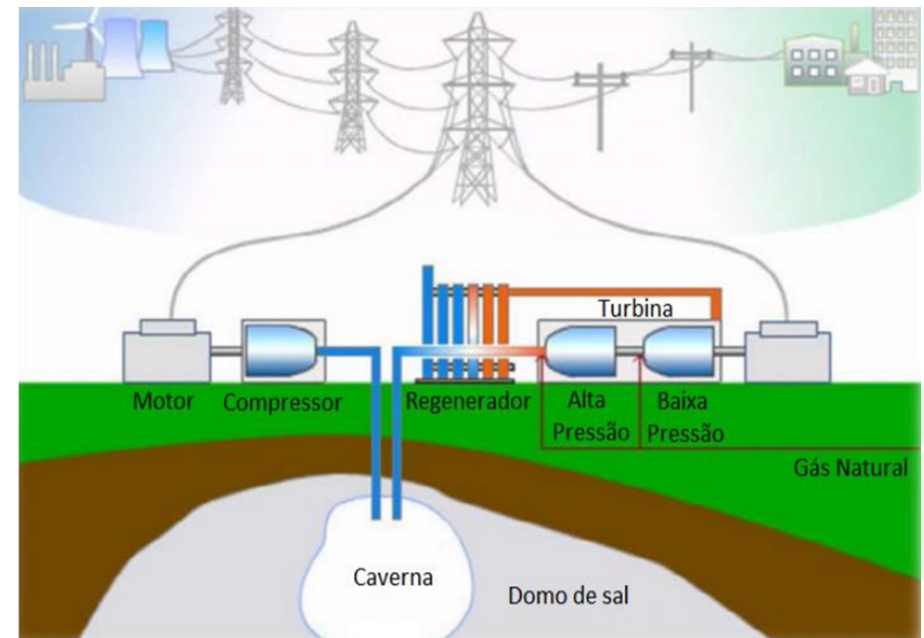


Princípio básico: Utiliza eletricidade fora do pico de demanda para comprimir o ar e armazenar em um reservatório. O ar é liberado no momento de pico de demanda, passando por um processo de aquecimento e é utilizado em uma turbina para gerar eletricidade



Principal desafio: adequação do projeto com as formações geológicas da região

Diagrama do processo de um sistema de armazenamento por ar comprimido



Fonte: (ANEKE; WANG, 2016)

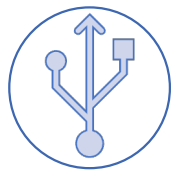
Armazenamento eletroquímico - BESS

Parâmetros específicos das baterias:



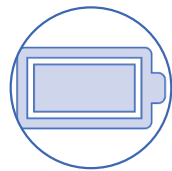
Tensão de circuito aberto

Medida quando a bateria não está funcionando;



Capacidade em Ampere-hora (Ah)

Quantidade de carga elétrica que ela consegue fornecer em uma tensão específica;



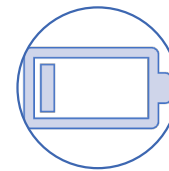
Estado de carga (SoC - State of charge)

Porcentagem disponível da capacidade da bateria em relação ao seu valor nominal;



Estado de performance (SoF - State of function)

Capacidade da bateria em realizar algumas partes específicas do ciclo de trabalho;



Profundidade de descarga (DoD - Depth of Discharge)

É a fração ou porcentagem de carga retirada da bateria numa determinada descarga;



Estado de saúde (SoH - State of health)

Reflete a condição da bateria e sua habilidade de entregar a performance especificada;



Máxima corrente de descarga da bateria - C-Rate

Corresponde a taxa de carga ou descarga em relação à capacidade máxima da bateria;



Tecnologias de armazenamento de energia

Armazenamento eletroquímico - BESS

Outros parâmetros das baterias:



Eficiência dos processos de conversão

Relação entre a saída de energia do dispositivo e a entrada de energia da tecnologia



Sensibilidade a temperatura

Performance da bateria a determinada faixa de temperatura;



Viabilidade

Grau de adaptabilidade às aplicações de armazenamento;



Durabilidade

Quantidade de ciclos de carga e descarga que mantém o sistema dentro de sua faixa de limites impostos na especificação;



Autonomia

Relação entre a capacidade energética e a potência máxima de carga;



Confiabilidade

Garantia de serviço;



Degradação dos equipamentos

Capacidade medida em ciclos que demandem a substituição de determinados equipamentos auxiliares, como conversores e dispositivos de controle



Custo

Custo de instalação, operação e manutenção da tecnologia;

Tecnologias de armazenamento de energia

Armazenamento eletroquímico – BESS – Íon de Lítio



Princípio básico: consistem em dois eletrodos, para o ânodo utiliza-se o grafite como material, para o cátodo, utiliza-se o óxido metálico de lítio. Para o eletrólito, utiliza-se um solvente orgânico que contém sais de lítio.

Vantagens: Possui alta energia específica; longo ciclo e vida útil prolongada; livre de manutenção; alta capacidade e baixa resistência interna.

Desvantagens: Necessidade de circuito de proteção para evitar fuga térmica se estressado; degradação em alta temperatura e quando armazenado em alta tensão. Impossibilidade de carga rápida em temperaturas de congelamento.

Tecnologias de armazenamento de energia

Tecnologias de armazenamento de energia em escala da rede e suas aplicações

Tecnologia	Aplicação primária	Vantagens	Desafios	
Eletroquímica	Baterias de chumbo ácido avançadas	- Nivelamento e regulação de carga - Reserva para estabilização de rede	- Tecnologia madura - Baixo custo - Boa duração da bateria	- Baixa densidade de energia - Corrosão do eletrodo limita a vida útil - Alta manutenção
	Baterias de enxofre de sódio	- Qualidade de potência - Alívio de congestionamento - Integração de fontes renováveis	- Alta densidade de energia - Longos ciclos de descarga - Resposta rápida - Vida longa - Bom potencial de escala	- Temperatura operacional necessária entre 250° e 300° C - Problemas de contenção de líquidos
	Baterias de Níquel Cádmio	Ilhamento	Tecnologia madura	- Alto custo - Baixa densidade de energia - Usa produtos químicos tóxicos
	Baterias de íons de lítio	- Qualidade de potência - Regulação da frequência	- Altas densidades de energia - Bom ciclo de vida - Alta eficiência de carga/descarga - Boa escalabilidade	- Alto custo de produção - Extremamente sensível ao excesso de temperatura, sobrecarga e acúmulo de pressão interna - Intolerância a descargas profundas de longa duração
	Baterias de fluxo	- Shaving - Time Shifting - Regulação de frequência	- Alta capacidade de armazenamento de energia - Longo ciclo de vida - Baixa eficiência de carga/descarga	- Tecnologia em desenvolvimento - Design complexo - Densidade de energia mais baixa



14ª Conferência Anual

14

Fonte: (ELECTROPAEDIA, 2023)

Tecnologias de armazenamento de energia

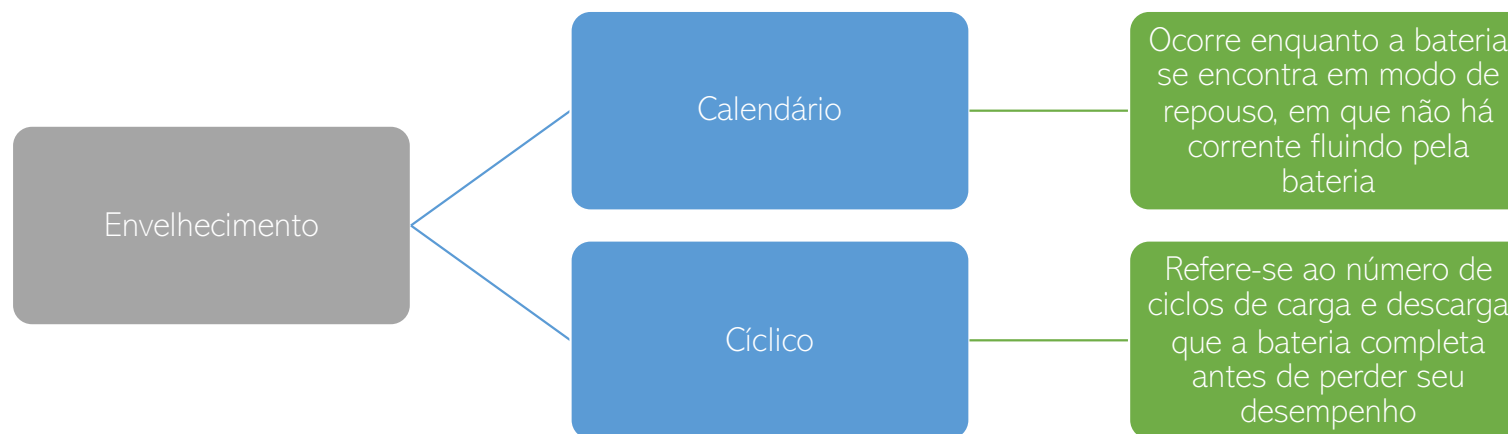
Tecnologias de armazenamento de energia em escala da rede e suas aplicações

Tecnologia	Aplicação primária	Vantagens	Desafios
Eletromagnético	Supercapacitores	• Vida muito longa • Altamente reversível • Carga e descarga extremamente rápidas	• Capacidade de potência muito alta • Mas capacidade muito baixa • Custo proibitivo para muitas aplicações
Mecânica	Usinas hidrelétricas reversíveis	• Tecnologia desenvolvida e madura • Custo do ciclo mais eficaz	• Disponibilidade geograficamente limitada do local da planta • Impactos ambientais • Alto custo de capital geral do projeto
	Volantes de Inercia Flywheels	• Tecnologia modular • Potencial comprovado para escala de utilidade • Disponível até 250 KWh • Longa vida útil • Alta potência de pico sem superaquecimento • Resposta rápida • Carga e descarga CA • Alta eficiência energética de ida e volta	• Limitações de resistência à tração do rotor • Tempo de armazenamento de energia limitado devido a altas perdas por atrito • Contenção em caso de falhas mecânicas

Vida útil e degradação

O envelhecimento das baterias refere-se a um processo irreversível causado por mudanças físicas e químicas ao longo dos anos, sendo intensificados por alguns fatores operacionais, como:

1. Carregamento de baterias com altas correntes
2. Carregamento a baixas temperaturas
3. Utilização ou armazenamento de células da bateria em temperaturas superiores a 40°C etc.



Critérios de desempenho

O desempenho técnico de um BESS pode ser expresso através de cinco principais benchmarks de desempenho:

Potência e capacidade energética: O BESS deverá ser capaz de importar e exportar a capacidade energética necessária nas respectivas potências de entrada e de saída.

Eficiência: O BESS limitará o custo da eletricidade necessária para cobrir as perdas elétricas e o consumo auxiliar.

Disponibilidade: A potência ativa total do BESS deve estar disponível para despacho a qualquer momento.

Qualidade do serviço: Quando despachado, a imprecisão da potência fornecida pelo BESS deve estar dentro dos limites aceitáveis para a aplicação específica.

Previsão de energia disponível: O BESS será capaz de fornecer uma previsão da quantidade de energia disponível, que pode ser exportada e importada e em qual potência.

Tecnologias de armazenamento de energia

Crítérios de desempenho

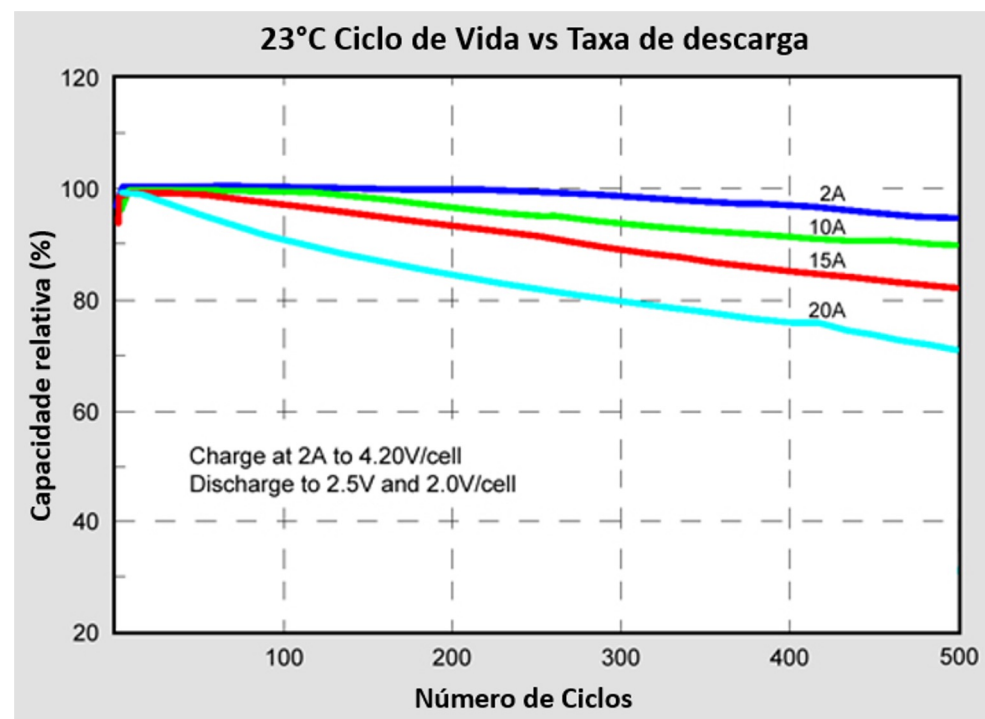
Capacidade de energia

Quantidade máxima de energia que a bateria é capaz de armazenar e fornecer quando solicitada

Duração da carga

Mudança ao longo da vida útil

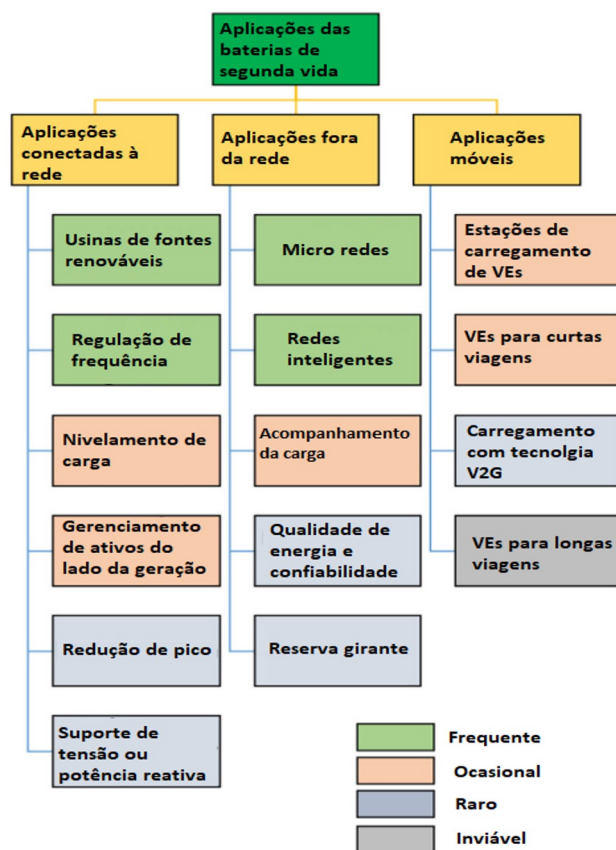
Exemplo de diminuição da capacidade de energia ao longo dos anos para um sistema BESS



Fonte: <https://batteryuniversity.com/article/bu-208-cycling-performance>

Tecnologias de armazenamento de energia

Baterias de segunda vida



Implicações em sistemas de bateria de “segunda vida” no setor elétrico (BESS)

a) **Falta de garantias:** as garantias formam uma estratégia essencial de mitigação de risco para projetos BESS.

b) **Esforço para caracterizar e classificar as baterias:** o estado das baterias de segunda vida geralmente não é conhecido. É preciso custo e esforço para caracterizar e classificar as baterias

c) **Falta de desempenho para BESS:** outras características como eficiência, disponibilidade e previsão de energia do sistema de bateria, também se deterioram. Isso as torna menos atraentes, especialmente para aplicações baseadas em energia de missão crítica comercialmente atraentes, onde essas características são obrigatórias.

d) **Compatibilidade elétrica:** os sistemas de bateria automotiva são construídos em torno de um projeto elétrico diferente da maioria dos BESS. Estes sistemas geralmente operam em uma faixa de tensão de 300 V - 400 V e não são projetados para serem conectados em série e em paralelo, enquanto os sistemas de bateria BESS operam em faixas de tensão entre 700 V - 1500 V.

Modelos de Negócios em Armazenamento de Energia



01

Um modelo de negócios é uma representação simplificada e estruturada de como uma empresa pretende criar, entregar e capturar valor.

02

Fornecer uma representação do funcionamento de uma empresa, ajudando a entender como ela cria, entrega e captura valor

03

Serve como um guia para a tomada de decisões estratégicas e pode ser ajustado e alterado à medida que a empresa evolui e se adapta às mudanças do mercado



Modelos de Negócios em Armazenamento de Energia

Business Model Canvas é uma ferramenta que divide um modelo de negócios em nove elementos-chave

Parcerias-Chave: • Fabricantes de baterias e componentes. • Empresas de energia renovável. • Empresas de serviços de energia.	Atividades-Chave: • Pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias. • Fabricação e montagem de sistemas de armazenamento de energia. • Instalação e manutenção dos sistemas.	Proposta de Valor: • Armazenamento de energia em baterias para reduzir a dependência da rede elétrica, aumentar a confiabilidade e melhorar a eficiência energética. • Fornecimento de energia renovável e limpa. • Solução personalizada para atender às necessidades específicas de cada cliente.	Relacionamento com Clientes: • Atendimento ao cliente para fornecer suporte técnico e assistência. • Estabelecimento de contratos de longo prazo com empresas de energia elétrica. • Programas de fidelidade e incentivos para consumidores residenciais.	Segmentos de Clientes: • Empresas de energia elétrica (distribuidoras, fornecedores de energia renovável, etc.). • Consumidores residenciais. • Empresas com alta demanda energética.
	Recursos-Chave: • Tecnologia de armazenamento de energia em baterias. • Equipe de P&D para inovação contínua. • Parcerias estratégicas com fabricantes de baterias.		Canais: • Parcerias com empresas de energia elétrica existentes. • Vendas diretas para consumidores residenciais. • Parcerias com empresas de energia renovável.	
Estrutura de Custos: • Custo de aquisição de baterias e componentes. • Custo de fabricação e montagem dos sistemas. • Custo de instalação e manutenção. • Despesas de marketing e vendas.			Fonte de Receitas: • Venda de sistemas de armazenamento de energia em baterias. • Receitas recorrentes por meio de contratos de fornecimento de energia ou potência. • Taxas de serviço e manutenção.	

21

Aplicações do BESS – Modelos de negócios

Para identificar e quantificar os custos e o valor que o BESS pode trazer a uma rede, é útil classificar os Modelos de Negócios e suas aplicações nessas três categorias

Aplicações de BESS baseadas em Energia

O BESS oferece seu valor por meio do chamado horário de uso (*TOU - Time Of Use*) onde a eletricidade é tratada como uma mercadoria, e o BESS agrega valor armazenando eletricidade quando ela tem baixo valor econômico e liberando a eletricidade armazenada nos momentos em que tem alto valor

Aplicações de BESS baseadas em Potência

Nessas aplicações, o valor da energia armazenada no BESS é secundário. Em vez disso, o BESS é usado para compensar um excesso temporário ou déficit de potência ativa na rede ou em uma seção específica da rede

Aplicações Mistas

Combinação das aplicações anteriores



Aplicações baseadas em Energia

Arbitragem de Preços (Negociação de Energia)

Negociação de energia é a aplicação de BESS mais intuitiva: a energia é adquirida e carregada no BESS quando o seu valor é baixo. Em seguida, é vendida e descarregada do BESS quando o seu valor é alto.

O lucro é obtido por meio da volatilidade do preço ao comprar e vender energia. A volatilidade diária é considerada uma métrica adequada para alcançar um número razoável de ciclos.



Deslocamento do Tempo de Geração de Energia Renovável

A intenção de usar o BESS para o deslocamento do tempo de geração de energia renovável é armazenar a eletricidade enquanto a energia primária está disponível e vendê-la ou usá-la localmente durante períodos de preços de mercado mais altos ou para atender à demanda.

O BESS aumenta a penetração da energia renovável em momentos de baixos recursos.



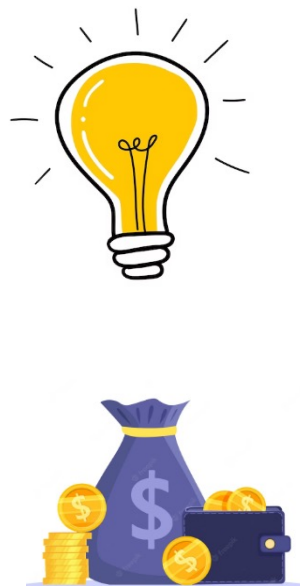
Aplicações baseadas em Energia

Deslocamento da Demanda de Pico

O objetivo é comprar e armazenar eletricidade durante os períodos do dia em que ela tem um preço baixo.

A eletricidade é utilizada para atender a uma demanda, seja consumo local, ou de uma indústria, em momentos em que o preço da eletricidade está alto.

O BESS reduz os custos de eletricidade para tarifas de pico em mercados com alta volatilidade nos preços da eletricidade.



Autoconsumo atrás do medidor

O autoconsumo atrás do medidor é uma aplicação em que a energia do BESS é armazenada através do valor no horário de eletricidade renovável variável. Esta energia não pode ser usada diretamente devido a uma discrepância entre o horário de geração e de consumo

Aplicações Mistas – Potência e Energia

Integração fraca de redes com maior fração de energias renováveis (acoplamento de geradores)

O BESS gera valor porque permite conectar geradores renováveis adicionais a uma rede que, de outra forma, não seria capaz de aceitar esses geradores devido a problemas de estabilidade de frequência causados por taxas de rampa renováveis excessivas (flutuações)

Integração off-grid de uma maior fração de energias renováveis e/ou otimização de geradores a diesel



O BESS é usado para manter o equilíbrio entre geração e consumo no sistema *off-grid*.



O BESS é responsável por manter a estabilidade da rede, propiciando um equilíbrio entre a geração e o consumo instantâneos a qualquer momento.



Os geradores convencionais podem ser temporariamente desligados parcial ou completamente.



A geração de eletricidade a partir de fontes renováveis variáveis pode ser armazenada e usada posteriormente, em vez de recorrer ao uso de geradores convencionais.

Combinação de aplicações: Empilhamento de receita

- ➔ Empilhamento de receita contribui para melhorar a viabilidade econômica dos SAE
- ➔ Ao participar em diferentes mercados e fornecer serviços auxiliares, esses sistemas podem contribuir para a estabilidade, confiabilidade e eficiência operacional do sistema elétrico, aumentando sua receita

Combinação em série

Uma combinação em série de aplicações de BESS é facilmente possível e viável em qualquer local onde haja duas aplicações adequadas e consiste no fornecimento de dois serviços em períodos diferentes.

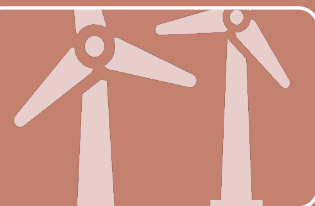
Combinação em paralelo

A combinação paralela de aplicações de BESS significa que o BESS fornece dois serviços ao mesmo tempo. A combinação paralela é mais complexa do que a combinação em série e não pode ser analisada de forma genérica.

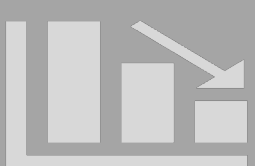
Mercado de armazenamento de energia



O mercado de armazenamento de energia (AE) tem experimentado um crescimento significativo internacionalmente, impulsionado pela transição energética e descarbonização.



Com o aumento da produção de energia renovável intermitente, o armazenamento de energia tornou-se fundamental para garantir a estabilidade do sistema elétrico, fornecer energia limpa e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

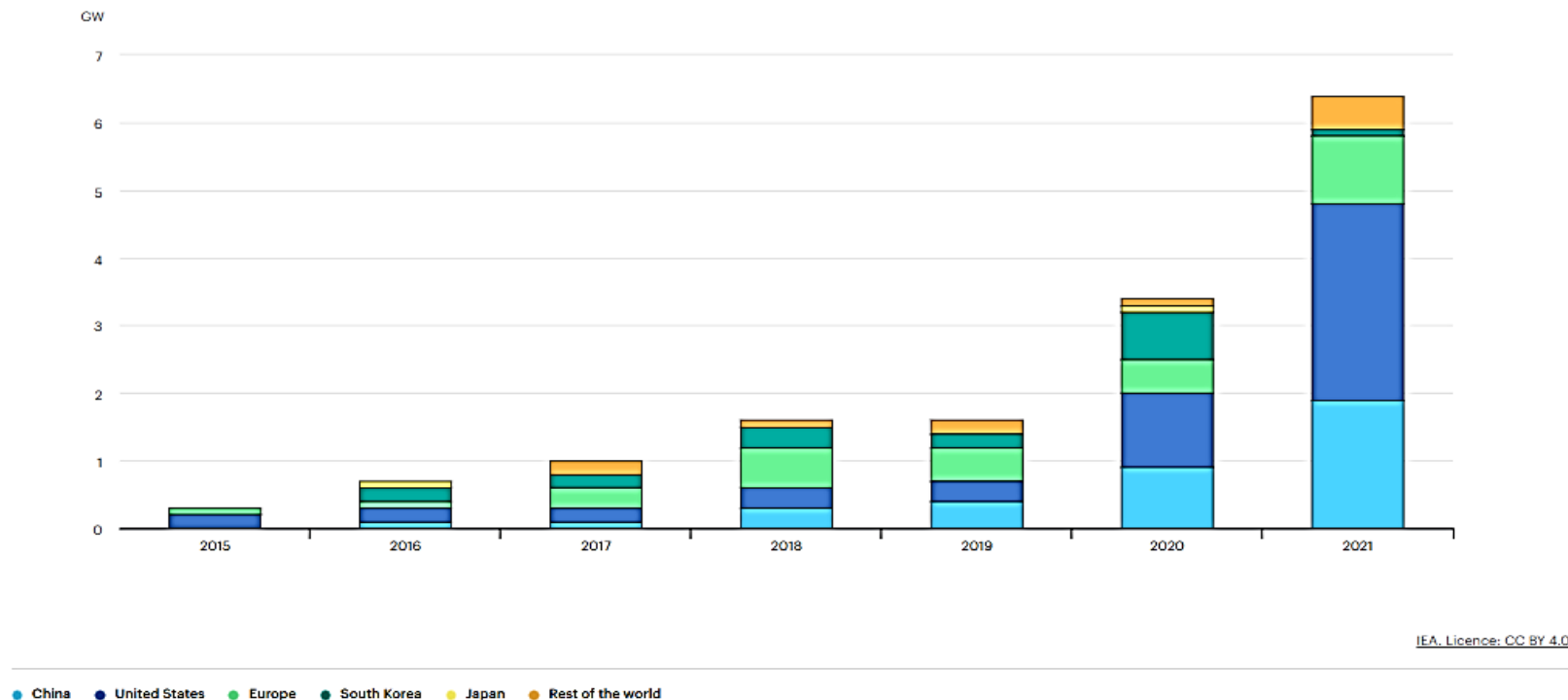


O Setor Elétrico Brasileiro tem a oportunidade de se beneficiar da redução de custos associados ao armazenamento de energia, bem como de melhorar a confiabilidade e a flexibilidade do sistema elétrico. Os consumidores também podem se beneficiar, permitindo-lhes reduzir os custos de energia, gerar sua própria energia renovável e aumentar a autonomia energética.



Mercado Internacional

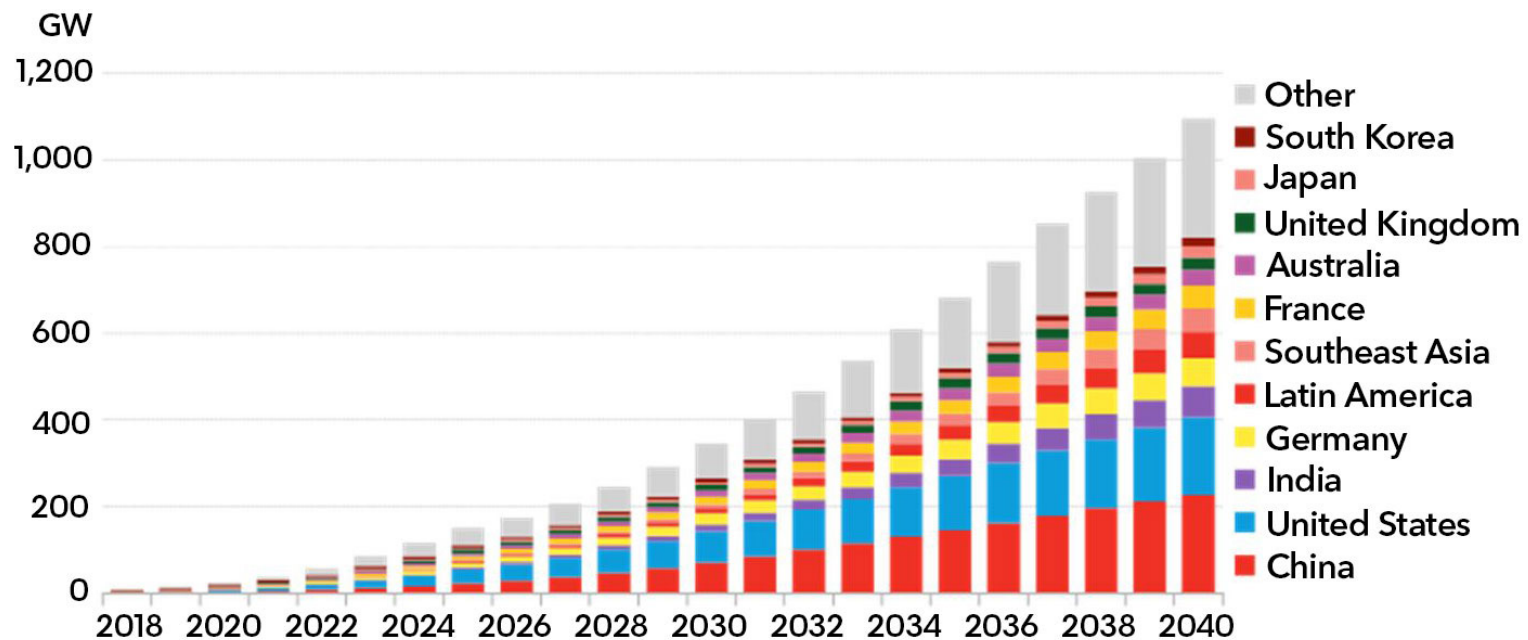
Adições anuais de armazenamento de bateria em escala de rede, 2016-2021



A capacidade total instalada de armazenamento de bateria em escala de rede ficou perto de **16 GW no final de 2021**, a maior parte foi adicionada **ao longo dos cinco anos anteriores**. Mais de **6 GW** de capacidade de armazenamento foram adicionados em 2021. (IEA, 2022)

Mercado Internacional

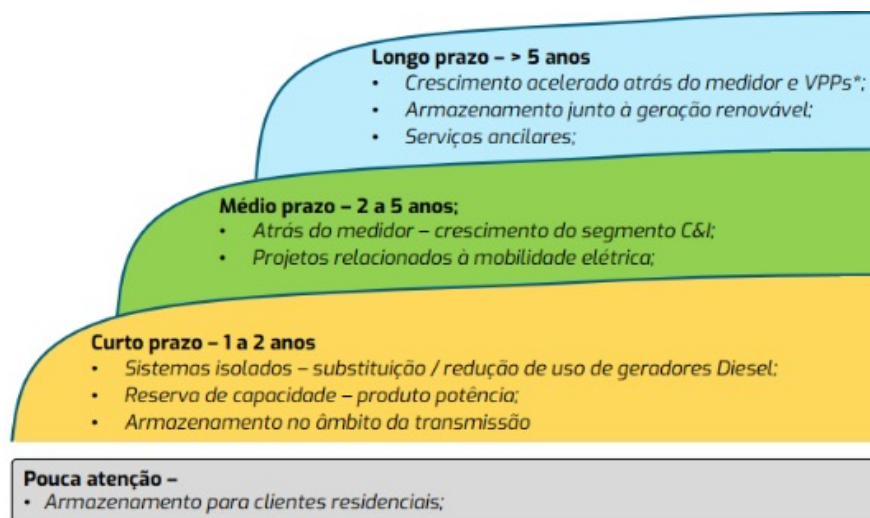
Previsão mundial de capacidade de armazenamento (MW) por país (Excluindo hidrelétrica reversível)



Fonte: EPE, 2019 e BNEF (2019)

Mercado Brasileiro

Perspectivas do mercado brasileiro nos próximos anos



Fonte: (NEWCHARGE e GIZ, 2022).

Fatores que impulsionam o mercado de armazenamento nacional

crescimento acelerado da geração fotovoltaica e eólica

grande mercado doméstico

políticas de universalização de energia elétrica,

demandas do Sistema Interligado Nacional (SIN)

aumento no uso de automóveis elétricos

posicionamento geográfico, já que a América do Sul possui mais de 60% das reservas de lítio do mundo

Apesar desses fatores, o mercado brasileiro de armazenamento ainda é pequeno. Em 2017 a ABAQUE realizou uma estimativa de potencial de mercado de 95 Gwh para armazenamento de energia, considerando suas principais aplicações

Consolidação do mercado de armazenamento de energia no

Regulação clara e precisa dos serviços ancilares

A regulação desses e outros serviços é fundamental para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico como um todo e trazer segurança jurídica e financeira ao mercado

Leilões de reserva de capacidade

Estes leilões são uma das principais ferramentas utilizadas pelo governo para estimular a instalação de novos SAEs. São realizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e têm como objetivo contratar a capacidade necessária para atender à demanda de energia elétrica em momentos de pico de consumo e garantir a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico brasileiro

Incentivos governamentais

O governo pode criar incentivos fiscais e financeiros para estimular o investimento em sistemas de armazenamento de energia através de **Carga tributária, Bancos de fomento e Incentivos para a pesquisa e desenvolvimento**

Considerações Finais

No Brasil, o armazenamento de energia tem potencial significativo na transição para um sistema elétrico ainda mais sustentável e eficiente. O país possui uma matriz energética diversificada, com parcela substancial de fontes renováveis: hidrelétrica, eólica e solar. O aumento da participação de renováveis variáveis, **cria desafios para a estabilidade da rede elétrica e a integração dessas fontes no sistema.**

Os aspectos regulatórios são cruciais na viabilidade dos modelos de negócios de armazenamento de energia. As regras e incentivos estabelecidos pelos órgãos reguladores, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), **podem influenciar a adoção e o desenvolvimento dessas tecnologias.**

À medida que o armazenamento de energia se torna amplamente adotado e os custos diminuem, espera-se que modelos de negócios relacionados ao **armazenamento residencial e comercial ganhem relevância.** Estes sistemas podem permitir a redução do consumo de energia da rede durante os horários de pico, aumentar a autonomia energética e fornecer energia de reserva em caso de falhas no fornecimento.

No longo prazo, com o avanço tecnológico e a consolidação do armazenamento de energia, **modelos de negócios mais complexos e integrados podem surgir.** Isso inclui o desenvolvimento de micro redes ou comunidades energéticas, onde diferentes fontes de energia e sistemas de armazenamento são coordenados para maximizar a eficiência e a sustentabilidade do fornecimento de energia local.

OBRIGADA

THEREZA CRISTINA NOGUEIRA DE
AQUINO



Email: taquino@poli.ufrj.br

Linkedin

