



# ConBRepro

XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



01 a 03  
de dezembro 2021

## Armazenamento de energia na indústria

Jairo Rodrigo Corrêa  
PPGEP - UTFPR

**Resumo:** Esta proposta buscou explorar o tema o armazenamento de energia que pode ser obtido com a conversão entre as formas de energia mecânica e elétrica por meio de em algumas tecnologias existentes: Flywheel, Armazenamento hidrelétrico bombeado e o Compressed air energy storage (CAES). Estes pretendiam explorar e exemplificar algumas das possibilidades e vantagens de aplicação nas indústrias. Por fim percebeu-se a necessidade de aprimoramento e os ganhos econômicos que o avanço que por meio destes tipos de tecnologia poderiam ser obtidos.

**Palavras-chave:** Flywheel, CAES, Armazenamento hidrelétrico bombeado.

## Energy storage in industry

**Abstract:** This proposal sought to explore the theme of energy storage obtained from the conversion between mechanical and electrical energy forms through some existing technologies: Flywheel, Pumped hydroelectric storage and Compressed air energy storage (CAES). These intended to explore and exemplify some of the possibilities and advantages of application in industries. Finally, it was noticed the need for improvement and the economic gains that the advancement that through these types of technology could be obtained.

**Keywords:** Flywheel, CAES, Hydroelectric Pumped Storage.

### 1. Introdução

O presente artigo refere-se ao armazenamento de energia, a produção de energia, e as possibilidades de utilização destas tecnologias para a produção industrial.

O armazenamento de energia pode permitir a utilização de diversas fontes renováveis de energia para a produção de energia elétrica, assim como que esta seja mais próxima ao consumidor que em algumas situações ainda reside ou trabalha em regiões conectadas à rede elétrica. Enquanto algumas tecnologias de armazenamento já se encontram em utilização em diversas aplicações para o setor elétrico como, por exemplo, as usinas hidráulicas reversíveis, algumas tecnologias de baterias de grande porte, outras tecnologias de armazenamento ainda se encontram em estágios iniciais de desenvolvimento com custos e falta de competitividade (SERRA; ORLANDO; MOSSÉ, 2016).

Os sistemas de armazenamento de energia têm sido tradicionalmente inviáveis economicamente, quando em escala comercial, o que tem sido contornado por evoluções nas tecnologias de armazenamento de energia elétrica.

Atualmente a viabilidade do emprego deste tipo de tecnologia considera três tipos de informações:

- a) Produção e consumo de eletricidade (perfis de carga);
- b) Características da bateria (armazenador), incluindo preço e desempenho;
- c) Preços e tarifas de eletricidade.

Alguns consumidores são cobrados a mais pelo uso de energia durante os horários de pico (prática conhecida como cobrança por demanda). O armazenamento de energia pode ser localmente usado para diminuir o pico de consumo (a maior quantidade de energia que um consumidor consome da rede), reduzindo assim a demanda e consequentemente o valor que os consumidores pagam pelos encargos de demanda.

Em nível residencial, a combinação de energia solar e de armazenamento só vale a pena quando existem condições específicas para tornar o valor do armazenamento maior que o custo de instalá-lo. Isso pode acontecer, por exemplo, quando o excesso de produção pode ser armazenado para consumo posterior; nesse caso, os consumidores precisam comprar menos energia empresa fornecedora e, assim, reduzir seus custos.

Dentre variadas possibilidades de utilização do armazenamento de energia existem os sistemas que se utilizam de tecnologias mecânicas baseadas volantes de inércia, no bombeamento de água em reservatórios (energia potencial gravitacional) e na compressão de ar.

O volante de inércia armazena energia rotacional através da aceleração de seu rotor de momento de inércia elevado de um motor que também funciona como gerador durante os períodos em que a energia elétrica está com custo reduzido (normalmente no período da madrugada).

No bombeamento de água em reservatórios a água é bombeada para o reservatório superior nos períodos de menor demanda de eletricidade e descarregada para o reservatório inferior gerando energia nos períodos de maior demanda (SERRA; ORLANDO; MOSSÉ, 2016).

A compressão de ar é utilizada atualmente como uma reserva para consumidores industriais e tem como objetivo basicamente nivelar a característica intermitente potência variável da geração de energia de fonte eólica.

Este sistema baseia-se na compressão em cavernas rochosas ou de sal durante os períodos de eletricidade de baixo custo. A energia armazenada é liberada utilizando-se gás natural para promover o aquecimento e a ignição desta mistura durante os períodos de pico de demanda nos quais o custo da energia elétrica é mais elevado. A mistura passa por uma turbina de expansão onde é queimada para acionar o gerador elétrico (SERRA; ORLANDO; MOSSÉ, 2016).

As novas tecnologias de armazenamento requerem investimentos com a finalidade de comprovar a viabilidade e consequente inserção no mercado. Este tipo de ação tem sido pesquisado para aprimorar o uso das novas energias renováveis na matriz energética brasileira.

Somente mediante toda a experimentação científica, brevemente sintetizada anteriormente, possibilitou todo o decorrente desenvolvimento tecnológico para a

produção de energia elétrica. Percebeu-se que neste formato de energia permitiu grande flexibilidade para a sua utilização final (BURATTINI, 2008, p.47).

A energia proveniente de uma hidroelétrica tem como princípio de funcionamento a utilização da energia potencial gravitacional da água contida em um reservatório mais elevado convertida em energia cinética durante o escoamento por meio de dutos.

A energia eólica já era utilizada para a realização de trabalhos mecânicos ao longo da história como, por exemplo, na utilização dos moinhos. Atualmente também são utilizados os aerogeradores nos quais o vento gira as suas pás e estas por fim, fornecem energia mecânica para o gerador elétrico.

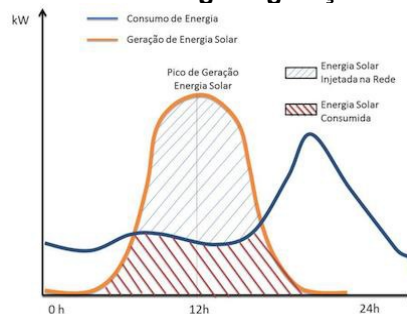
## 2. Armazenamento de energia

A energia é fundamental para o desenvolvimento humano e a prosperidade. Sob essa perspectiva, vale ressaltar a invenção do motor a vapor com a consequente revolução industrial e o uso de energia pela civilização.

A energia elétrica é uma das formas mais comuns de energia usada no planeta cuja descoberta permitiu um grande desenvolvimento tecnológico, transformando a eletricidade em outras formas de energia (BARBOSA, 2006, p.22).

O armazenamento de energia tem muitos benefícios. É particularmente importante para o desenvolvimento e integração de tecnologias que envolvam fontes renováveis de energia. Algumas fontes de energia renovável têm perfis de geração intermitentes, o que significa que a eletricidade só é produzida quando, por exemplo, o sol está brilhando ou quando o vento está soprando. Isso cria discrepâncias entre oferta e demanda, uma vez que pode haver a necessidade de energia elétrica, mesmo na ausência de sua produção por fontes renováveis. Na Figura 1 ilustra-se esse fato.

**Figura 1 – Consumo de energia e geração de energia solar**

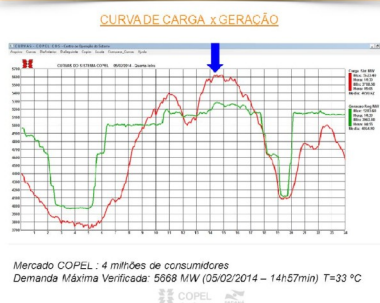


**Fonte: CURVA DE CARGA x GERAÇÃO. In: Planejamento, coordenação e operação. Slideplayer, 2016. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/10704968/37/images/37/CURVA+DE+CARGA+x+GERA%C3%87%C3%83O.jpg>. Acesso em: 12 abr. 2021.**

Atualmente, as redes fornecem eletricidade em tempo real, o que significa que a eletricidade está sendo constantemente produzida para atender à demanda do consumidor. Como resultado, os sistemas de geração de eletricidade são construídos para atender ao pico de demanda.

Na Figura 2 ilustra-se esse fato.

## Figura 2 – Curva de carga x geração



Fonte: CURVA DE CARGA x GERAÇÃO. In: Planejamento, coordenação e operação. Slideplayer, 2016. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/10704968/37/images/37/CURVA+DE+CARGA+x+GERA%C3%87%C3%83O.jpg>. Acesso em: 12 abr. 2021.

Dentre várias possibilidades, o armazenamento de energia permite:

- Armazenar energia para ser utilizada em períodos de maior demanda.
- Atenuar as pequenas flutuações na produção de energia em pequenas e/ou grandes fontes de geração.
- Utilização na área de transportes por: veículos elétricos, trens, bicicletas, dentre outros.

Os sistemas de armazenamento de energia têm sido tradicionalmente inviáveis economicamente, quando em escala comercial, o que tem sido contornado por evoluções nas tecnologias de armazenamento de energia elétrica.

Atualmente a viabilidade do emprego deste tipo de tecnologia considera três tipos de informações:

- Produção e consumo de eletricidade (perfis de carga);
- Características da bateria (armazenador), incluindo preço e desempenho;
- Preços e tarifas de eletricidade.

Alguns consumidores são cobrados a mais pelo uso de energia durante os horários de pico (prática conhecida como cobrança por demanda). O armazenamento de energia pode ser localmente usado para diminuir o pico de consumo (a maior quantidade de energia que um consumidor consome da rede), reduzindo assim a demanda e consequentemente o valor que os consumidores pagam pelos encargos de demanda.

Em nível residencial, a combinação de energia solar e de armazenamento só vale a pena quando existem condições específicas para tornar o valor do armazenamento maior que o custo de instalá-lo. Isso pode acontecer, por exemplo, quando o excesso de produção pode ser armazenado para consumo posterior; nesse caso, os consumidores precisam comprar menos energia empresa fornecedora e, assim, reduzir seus custos.

Existem muitas formas de armazenamento de energia. Dentre elas destacam-se as que utilizam:

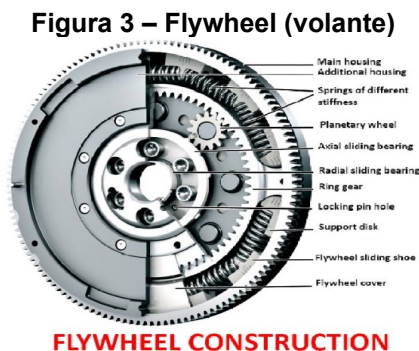
- Baterias que empregam uma variedade de soluções de armazenamento eletroquímico.

- Baterias de fluxo nas quais a energia é armazenada diretamente na solução de eletrólitos, permitindo ciclos de carga e descarga.
- Térmica na qual calor é convertido em energia elétrica.
- Volantes, os quais são dispositivos mecânicos que transformam a energia rotacional em elétrica.
- Ar comprimido, o qual pode gerar energia elétrica pela rotação de sistemas que envolvem bobinas elétricas.
- Hidrelétrica bombeada a qual converte energia potencial hidráulica em energia elétrica, pela rotação de turbinas.

A escolha da tecnologia de armazenamento de energia é tipicamente ditada pela aplicação, economia, integração ao sistema e disponibilidade de recursos.

### 3. Flywheel

Um Flywheel (volante) (Figura 3) é um rotor de momento de inércia elevado usado para armazenar energia rotacional para posteriormente converter em energia elétrica. É utilizado em horários cujo valor da energia elétrica é mais elevado bem como em ocasiões com perturbações referentes a perda de geração de energia elétrica (SERRA; ORLANDO; MOSSÉ, 2016).



Fonte: ENGINE FLYWHEEL CONSTRUCTION. In: Engine Construction. Newkidscar, 2021. Disponível em: <https://www.newkidscar.com/wp-content/uploads/2019/08/flywheel-construction.jpg>. Acesso em: 12 abr. 2021.

A tecnologia do volante possui propriedades que permitem melhorar nossa atual rede elétrica. Um volante é capaz de receber energia de fontes intermitentes e injetá-las na rede elétrica.

Os volantes são tradicionalmente feitos de aço e giram em rolamentos convencionais; estes são geralmente limitados a uma taxa de revolução de alguns milhares de rotações por minuto (RPM). Nos projetos mais avançados, os volantes são feitos de materiais como fibra de carbono, armazenados em vácuo para reduzir o arrasto e empregam levitação magnética em vez de rolamentos convencionais.

Na produção industrial existem aplicações desta tecnologia entretanto ainda limita-se ao suprimento de energia para curtos intervalos de falta de energia elétrica como os afundamentos de tensão e as “falhas momentâneas (FM). Outro fator que necessita de aprimoramento é o consumo que pode chegar a aproximadamente um adicional de 10% da energia consumida, o que ainda pode ser economicamente inviável, dependendo do custo da parada.

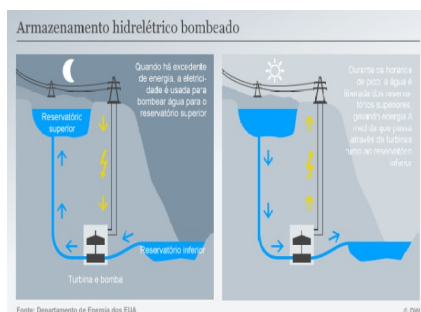
#### 4. Armazenamento Hidroelétrico Bombeado

A força gravitacional é de fundamental importância para sustentar uma das tecnologias de geração de energia mais utilizadas no Brasil: a hidrelétrica bombeada.

Uma barragem hidroelétrica convencional utiliza um fluxo de água através de uma turbina, quando esta se desloca de um nível mais alto para um mais baixo de um reservatório. No processo, energia potencial gravitacional armazenada pela água é convertida em energia cinética do movimento das pás de uma turbina a qual finalmente é energia elétrica injetada na rede elétrica conectada às residências e indústrias de um local.

Durante períodos de alta demanda de eletricidade, a energia elétrica assim produzida é liberada. Durante períodos de baixa demanda, o reservatório superior é recarregado por bombeamento usando eletricidade armazenada na rede elétrica. O processo é mostrado esquematicamente na Figura 4.

**Figura 4 – Armazenamento hidroelétrico bombeado**



**Fonte: ARMAZENAMENTO HIDRELÉTRICO BOMBEADO. In: Análise: Mudanças climáticas podem acabar com hidrelétricas? Infraroi, 2018. Disponível em: [https://www.dw.com/image/42812457\\_401.png](https://www.dw.com/image/42812457_401.png). Acesso em: 12 abr. 2021.**

Essa geração de energia é, muitas vezes, bastante eficiente (a eficiência por ciclo chega a mais de 80%).

Embora as instalações de armazenamento por bombeamento em um primeiro momento não pareçam fazer muito sentido, podem ser muito econômicas, pois a diferença de preço do kWh pode chegar a ser 16 vezes menor dependendo com o horário de consumo, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Custo da energia elétrica de acordo com o horário

MODALIDADES TARIFARIAS HORARIAS															
Modalidade Tarifária Azul - Grupo A															
SUBGRUPO	TUSD			PONTA								TE			
	DEMANDA PONTA	DEMANDA FORA DE PONTA	R\$/kWh	BAND. AMARELA				BAND. VERDE				BAND. AMARELA		BAND. VERDE	
				TE	AMARELA	VERDE	VERDE	TE	AMARELA	VERDE	VERDE	TE	AMARELA	VERDE	VERDE
A3 (9kV)	14,25	5,88	0,06359	0,43245	0,015	0,040	0,060	0,25950	0,015	0,040	0,060	0,25950	0,015	0,040	0,060
A3a (30 a 44kV)	31,83	13,75	0,07979	0,43245	0,015	0,040	0,060	0,25950	0,015	0,040	0,060	0,25950	0,015	0,040	0,060
A4 (2,3 a 25kV)	31,83	13,75	0,07979	0,43245	0,015	0,040	0,060	0,25950	0,015	0,040	0,060	0,25950	0,015	0,040	0,060
A5 (Subterrâneo)	63,86	14,10	0,10741	0,43245	0,015	0,040	0,060	0,25950	0,015	0,040	0,060	0,25950	0,015	0,040	0,060

Modalidade Tarifária Verde - Grupo A															
SUBGRUPO	TUSD			PONTA								TE			
	DEMANDA PONTA	DEMANDA FORA DE PONTA	R\$/kWh	BAND. AMARELA				BAND. VERDE				BAND. AMARELA		BAND. VERDE	
				TE	AMARELA	VERDE	VERDE	TE	AMARELA	VERDE	VERDE	TE	AMARELA	VERDE	VERDE
A3a (30 a 44kV)	13,75	0,85456	0,07979	0,43245	0,015	0,040	0,060	0,25950	0,015	0,040	0,060	0,25950	0,015	0,040	0,060
A4 (2,3 a 25kV)	13,75	0,85456	0,07979	0,43245	0,015	0,040	0,060	0,25950	0,015	0,040	0,060	0,25950	0,015	0,040	0,060
A5 (Subterrâneo)	14,10	1,66291	0,10741	0,43245	0,015	0,040	0,060	0,25950	0,015	0,040	0,060	0,25950	0,015	0,040	0,060

Modalidade Tarifária Branca - Grupo B														
SUBGRUPO	ENERGIA ELÉTRICA CONSUMO R\$/kWh			ADICIONAL BANDEIRAS R\$/kWh										
	Ponta	Intermed.	Fora Ponta	Amarela	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
B1 Residencial	0,34276	0,60704	0,44426	0,015	0,040	0,060								
B2 Rural	0,71650	0,46135	0,33764	0,015	0,040	0,060								
B3 Com/Industr.	0,98486	0,63230	0,45268	0,015	0,040	0,060								

Condições para opção tarifária em Baixa Tensão: transformador até 112,5kVA. Modalidade Tarifária Convencional: entrada em 24/09/2015. Solicitação de mudança tarifária somente após 12 faturamentos completos na modalidade anterior ou até o 3º faturamento após reajuste tarifário.

Consulte a débitos, históricos de faturamento, consumo, demanda contratada e medição, fator de potência ou gráficos correlatos, simulação modalidade tarifária e z- via de fatura, acessar: <http://www.copel.com> - Agência Virtual.

TUSD - TARIFA DE USO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO.  
 TE - TARIFA DE ENERGIA COMPOSTAS PELA PARCELA DE TRANSPORTE, PERDAS E ENCARGOS, TERMOS DA RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 484/11.  
 AS TARIFAS TUSD E TE ESTÃO APRESENTADAS DE FORMA UNIFICADA NAS FATURAS A PARTIR DE 01/05/2015.  
 \* BANDEIRAS TARIFARIAS APLICADAS A PARTIR DE 03/02/2015. INFORMAÇÕES: [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)  
 HORÁRIO DE PONTA: DAS 17H AS 20H59 - 2ª A 6ª FÉRIAS: DAS 17H AS 21H59 NO HORÁRIO DE VERÃO.  
 HORÁRIO FORA DE PONTA: DEMAS HORAS DO DIA, FÉRIAS DE SEMANA E FÉRIAS NACIONAIS.

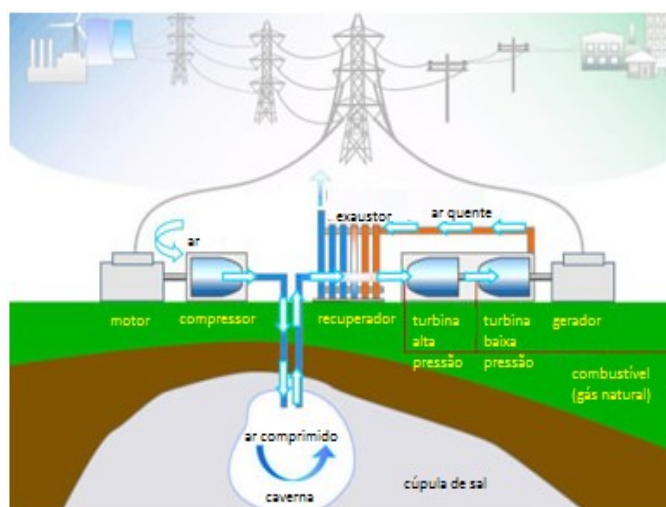
Fonte: Disponível em: TABELA DE TARIFAS. In: Taxas e tarifas. Copel, 2019. Disponível em: [https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/tabela\\_tarifas.jpg/\\$FILE/tabela\\_tarifas.jpg](https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/tabela_tarifas.jpg/$FILE/tabela_tarifas.jpg). Acesso em: 12 abr. 2021.

Em uma indústria esta forma de armazenamento de energia poderia ser com mo a água dos reservatórios internos ou mesmo dejetos de acordo com a densidade ou viscosidade.

## 5. Geração de energia usando-se ar comprimido

A geração de energia elétrica pela utilização de ar comprimido é um método eficiente, limpo e econômico. Em 1973 a CAES (Compressed Air Energy Storage) instalou na Alemanha, a primeira usina de geração de energia usando ar comprimido. Esse ar é comprimido em cavernas subterrâneas nas imediações da planta, usando-se energia elétrica de baixo custo (a que é gerada fora dos horários de pico). Nos horários de maior demanda, o ar armazenado é liberado através de dutos para a movimentação das pás de turbinas, as quais gerarão energia elétrica, processo semelhante ao que ocorre em uma usina hidroelétrica. O processo é descrito esquematicamente na Figura 6.

Figura 6 – Compressed air energy storage



Fonte: MESSINA, John. Compressed Air Energy Storage: Renewable Energy. Phys.org, 2010. Disponível em: <https://scx1.b-cdn.net/csz/news/800/compressedai.jpg>. Acesso em: 12 abr. 2021.

Por meio de recipientes adequados poderia ser utilizado deste meio para o armazenamento de energia elétrica para uma utilização conforme a necessidade.

## 6. Considerações gerais

A energia em si constitui algo fundamental em todos os processos produtivos.

O estudo de tecnologias de armazenamento de energia é algo importante com a finalidade de ajustar as curvas de carga e geração para valores economicamente viáveis, considerando os horários de maior demanda.

Também é fundamental quando considera-se o custo das perdas de produção em uma parada por falha no fornecimento de energia elétrica,

Por fim, permite maneiras de contornar-se o alto custo com combustíveis fósseis que normalmente são as alternativas mais utilizadas para os dois parágrafos anteriores.

## Referências

BURATTINI, Maria Paula T. de Castro. **Energia: uma abordagem multidisciplinar**. São Paulo: Livraria da Física, 2008.

SERRA, Eduardo T.; ORLANDO, Alcir de Faro; MOSSÉ, Acher; MARTINS, Nelson Martins. **Armazenamento de Energia: Situação atual, perspectivas e recomendações**. Comitê de Energia da Academia Nacional de Engenharia, 2016.

CURVA DE CARGA x GERAÇÃO. In: **Planejamento, coordenação e operação**. Slideplayer, 2016. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/10704968/37/images/37/CURVA+DE+CARGA+x+GERA%C3%87%C3%83O.jpg>. Acesso em: 12 abr. 2021.

ENGINE FLYWHEEL CONSTRUCTION. In: **Engine Construction**. Newkidscar, 2021. Disponível em: <https://www.newkidscar.com/wp-content/uploads/2019/08/flywheel-construction.jpg>. Acesso em: 12 abr. 2021.

ARMAZENAMENTO HIDRELÉTRICO BOMBEADO. In: Análise: **Mudanças climáticas podem acabar com hidrelétricas?** Infraroi, 2018. Disponível em: [https://www.dw.com/image/42812457\\_401.png](https://www.dw.com/image/42812457_401.png). Acesso em: 12 abr. 2021.

Disponível em: TABELA DE TARIFAS. In: **Taxas e tarifas**. Copel, 2019. Disponível em: [https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/tabela\\_tarifas.jpg/\\$FILE/tabela\\_tarifas.jpg](https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/tabela_tarifas.jpg/$FILE/tabela_tarifas.jpg). Acesso em: 12 abr. 2021.

MESSINA, John. **Compressed Air Energy Storage: Renewable Energy**. Phys.org, 2010. Disponível em: <https://scx1.b-cdn.net/csz/news/800/compressedai.jpg>. Acesso em: 12 abr. 2021.