

Tecnologias para Sistemas de Energia Espaciais

2023/24

Capítulo 5

5. Armazenamento de Energia: princípios e aplicações
21/11/2023 e 5/12/2023

Carlos Marques

Armazenamento de Energia

Disponibilidade e intermitência

Eletricidade intermitente – o problema!

A eletricidade intermitente é a energia elétrica que não está continuamente disponível devido a fatores externos que não podem ser controlados

- produzida por fontes geradoras de eletricidade que variam nas suas condições numa escala de tempo bastante curta.

As fontes de eletricidade intermitente incluem

- energia solar, energia eólica, energia das marés e energia das ondas

Embora a energia solar e das marés sejam bastante previsíveis (duração dos dias, padrões climáticos, ciclos das marés), ainda são intermitentes porque o período de tempo durante o qual a eletricidade pode ser criada é limitado.

Devido a esta geração elétrica variável, estas fontes são intermitentes

- a produção elétrica não pode ser utilizada em qualquer momento para satisfazer as necessidades flutuantes de eletricidade das sociedades

Armazenamento de Energia

Disponibilidade e intermitência

Eletricidade intermitente – o problema!

Energia solar:

A energia solar é intermitente e, na maioria das vezes, não disponível.

- A energia solar para a Terra não é a mesma em todos os locais e também é afetada pelas condições na troposfera.
- Impossível fazer uma utilização consistente deste recurso para a produção de eletricidade sem a utilização de armazenamento de eletricidade.

Energia eólica:

A energia eólica é considerada altamente intermitente porque é uma fonte de energia variável

- velocidade do vento, densidade do ar, características da turbina etc. Todos esses fatores também mudam dependendo da localização. A velocidade do vento: (dependendo da turbina), acima de 3,5 m/s para gerar eletricidade, e abaixo de 25 m/s para evitar danos à turbina
- A energia eólica é a fonte de energia primária que mais necessita de opções de armazenamento de energia de alta qualidade.

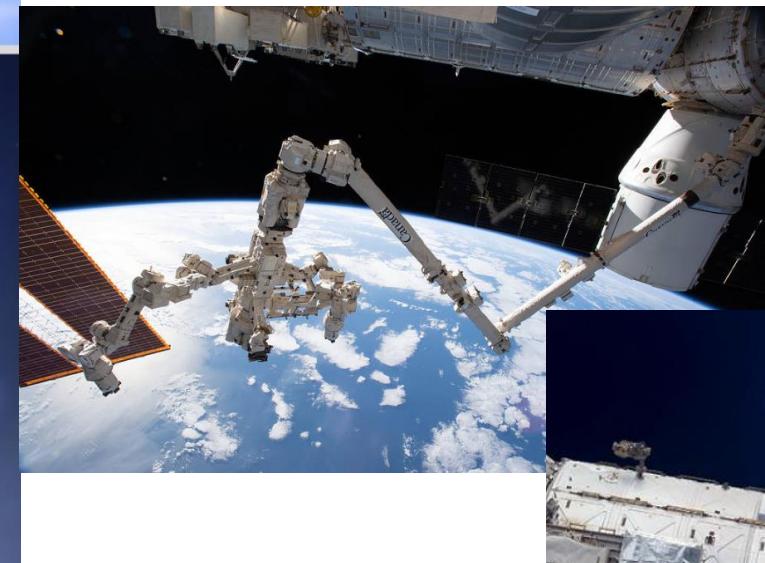
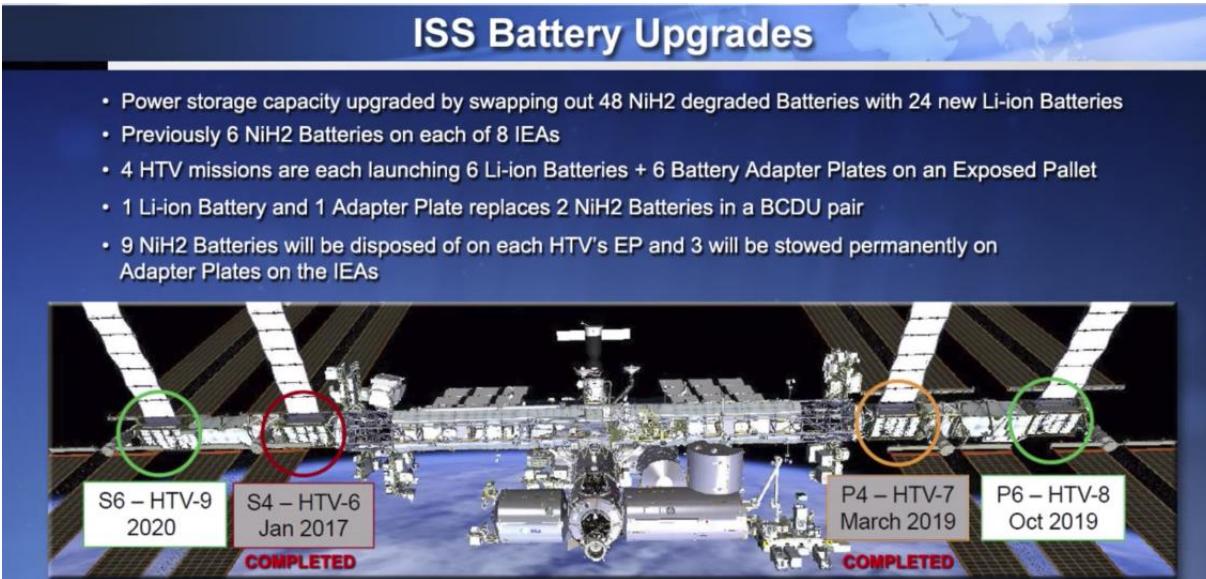
Armazenamento de Energia

Disponibilidade e intermitência

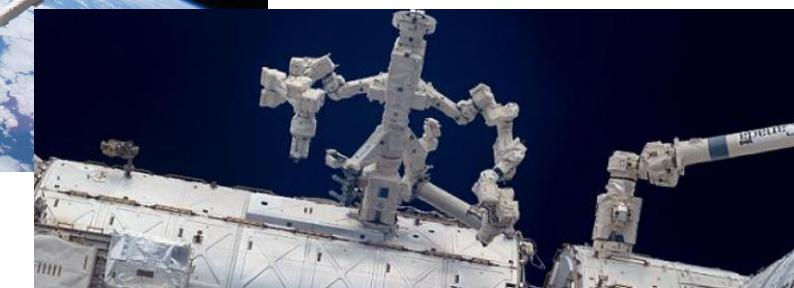
Eletricidade intermitente – o problema para a ISS!

Como a estação muitas vezes não fica exposta à luz solar direta

- baterias recarregáveis de iões de lítio (inicialmente baterias de níquel-hidrogénio) para fornecer energia contínua durante a parte "eclipse" da órbita (35 minutos a cada 90 minutos de órbita).
- Cada conjunto de baterias, situado nas treliças S4, P4, S6 e P6, consiste em 24 células leves de bateria de iões de lítio e equipamentos elétricos e mecânicos associados. Cada conjunto de bateria tem uma capacidade nominal de 110 Ah (originalmente 81 Ah) e 4 kWh (14 MJ).



Canadarm2/Dextre



Armazenamento de Energia

Disponibilidade e intermitência

Eletricidade intermitente – o problema para a ISS!

“Palete” repleta de baterias antigas de níquel-hidrogénio, fotografado logo após ser libertada pelo braço robótico Canadarm2. O objeto estava a orbitar a 427 km acima do Chile quando esta foto foi tirada da ISS (2021).

- 2,9 T e viajando a 7,8 km/s, é agora o lixo mais pesado a ser descartado da ISS.
 - permanecerá na órbita baixa da Terra pelos 2-4 anos “antes de queimar na atmosfera”, de acordo com um comunicado da NASA.
 - Considerado o “objeto mais massivo já lançado da ISS para órbita”.



Canadarm2



Armazenamento de Energia

Disponibilidade e intermitência

Com a aproximação rápida dos objetivos da próxima fase do Acordo de Paris, governos e organizações procuram aumentar a adoção de fontes de energia renováveis.

Uma oportunidade significativa:

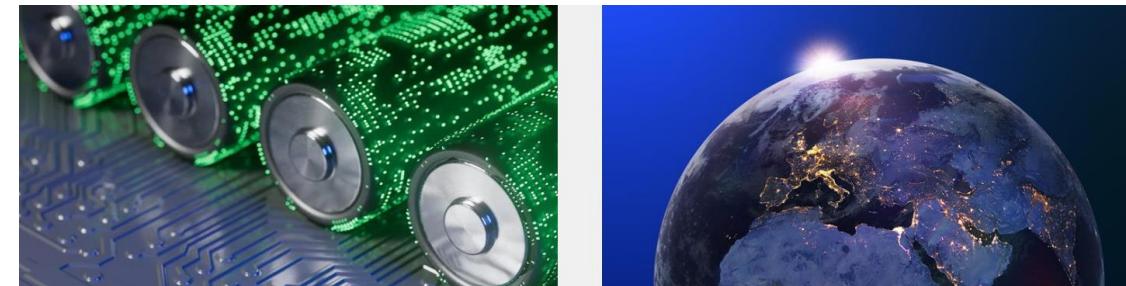
Mais de 5 mil milhões de dólares foram investidos em **sistemas de armazenamento de energia de bateria (SAEB)** em 2022

- um aumento quase triplicado em relação ao ano anterior.

Esperamos que o mercado global de SAEB atinja entre 120 mil milhões e 150 mil milhões de dólares até 2030

- mais do dobro do seu tamanho atual.

CONTUDO: ainda é um mercado fragmentado, com muitos fornecedores a questionarem-se onde e como competir.



Armazenamento de Energia

Disponibilidade e intermitência

Segmentar o mercado pelas aplicações e tamanhos dos utilizadores. Existem três segmentos:

- instalações em escala de serviços públicos front-of-the-meter (FTM), que normalmente são maiores que 10 MWh;
- instalações comerciais e industriais behind the meter (BTM), que normalmente variam de 30 kWh a 10 MWh;
- instalações residenciais BTM, que geralmente têm potência inferior a 30 kWh

Battery energy storage systems are used across the entire energy landscape.

	Front of the meter (FTM)	Behind the meter (BTM)
Use cases	  Electricity generation and distribution	  Commercial and industrial (C&I)
	Price arbitrage Long-term capacity payments Ancillary service markets Derisking renewable generation Investment deferral	Renewable integration (rooftop photovoltaic) Uninterruptable power supply (UPS) Power cost optimization Electric-vehicle (EV) charging infrastructure

Source: McKinsey Energy Storage Insights



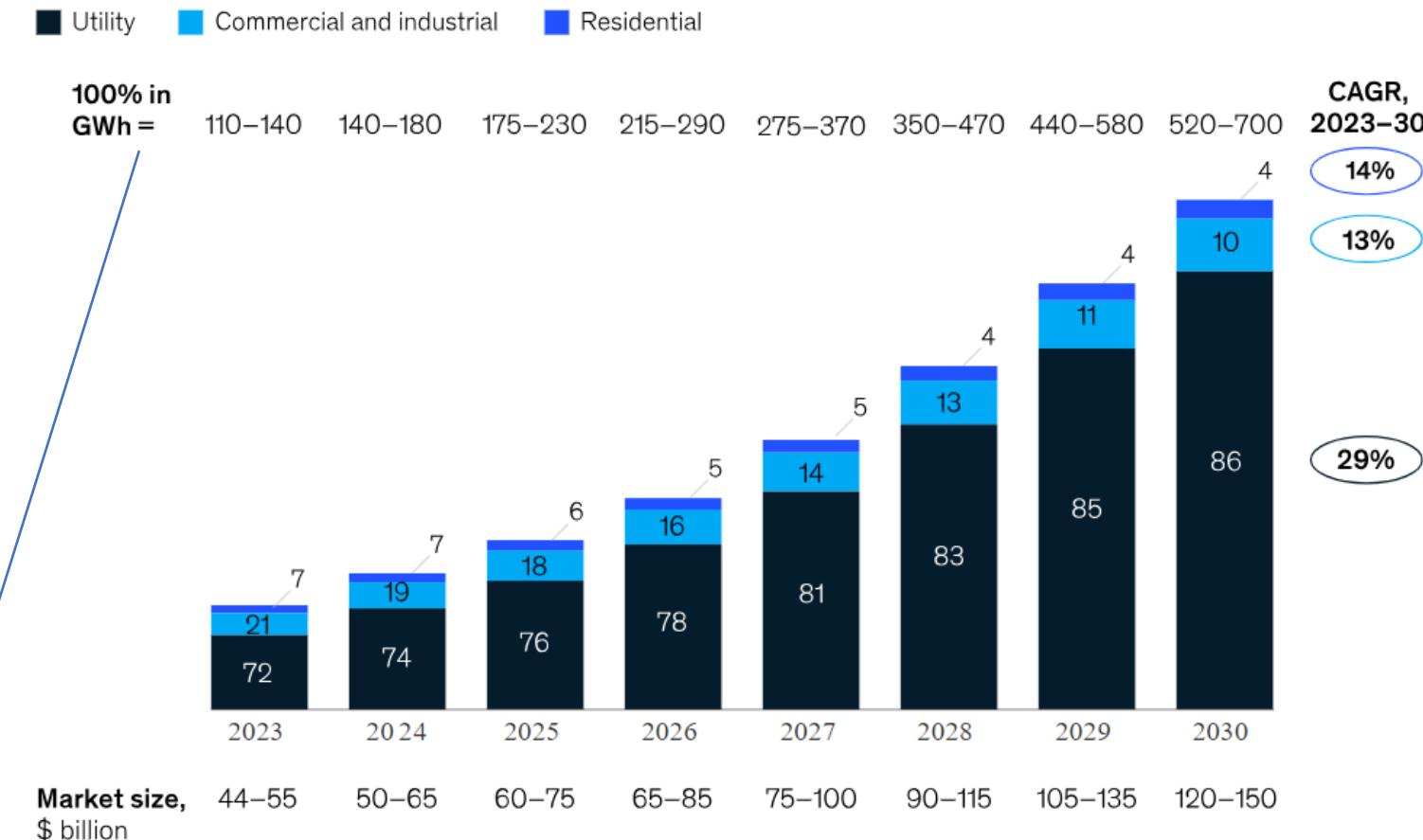
Armazenamento de Energia

Disponibilidade e intermitência

Espera-se que os SAEB à escala de serviços públicos cresça cerca de 29% ao ano durante o resto desta década – o mais rápido dos três segmentos.

Os 520 a 700 GWh previstos para 2030 em instalações anuais de grande escala dariam aos SAEBs uma quota de até 90 % do mercado total nesse ano

A capacidade dos SAEBs será o 5x mais entre agora e 2030.



Note: Figures may not sum to 100%, because of rounding.
Source: McKinsey Energy Storage Insights BESS market model

Armazenamento de Energia

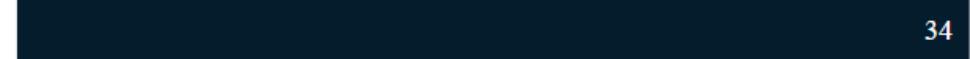
Disponibilidade e intermitência

Dados importantes como:

- Preço
- Performance
- Segurança
- Garantia
- Fácil instalação
- ...

Key buying factors

Price and performance



Safety and warranty



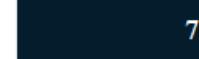
Ease and cost of installation or delivery lead time



Supplier brand or local engineering



Servicing and maintenance



Software capabilities and offerings



Sustainability footprint of the system



Space requirements and volume of the system



¹Battery energy storage system.
Source: McKinsey BESS Customer Survey, 2023, German market (n = 300)

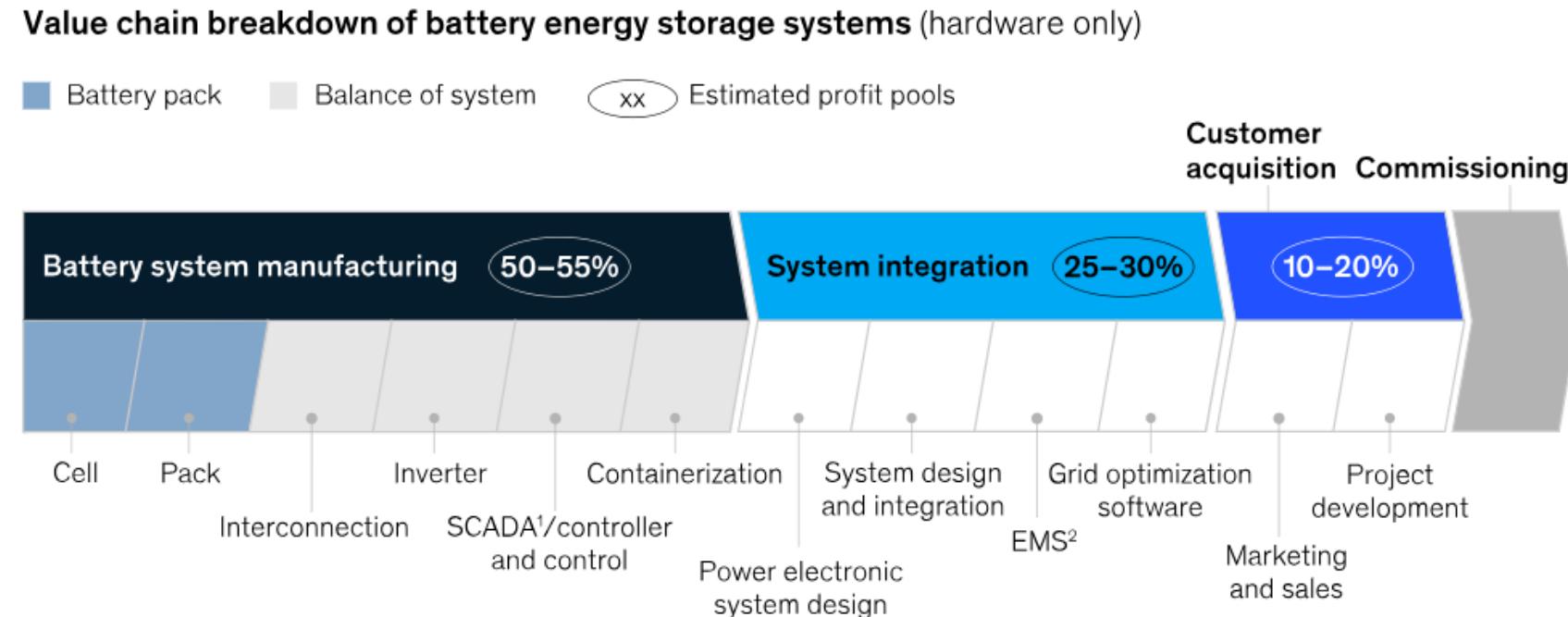
McKinsey & Company



Armazenamento de Energia

Disponibilidade e intermitência

Cadeia de valor dos SAEBs inclui fabricação, integração de sistema e aquisição de clientes



¹Supervisory control and data acquisition.

²Energy management system.

Source: GTM Research; McKinsey Energy Storage Insights BESS market model

Armazenamento de Energia

Disponibilidade e intermitência

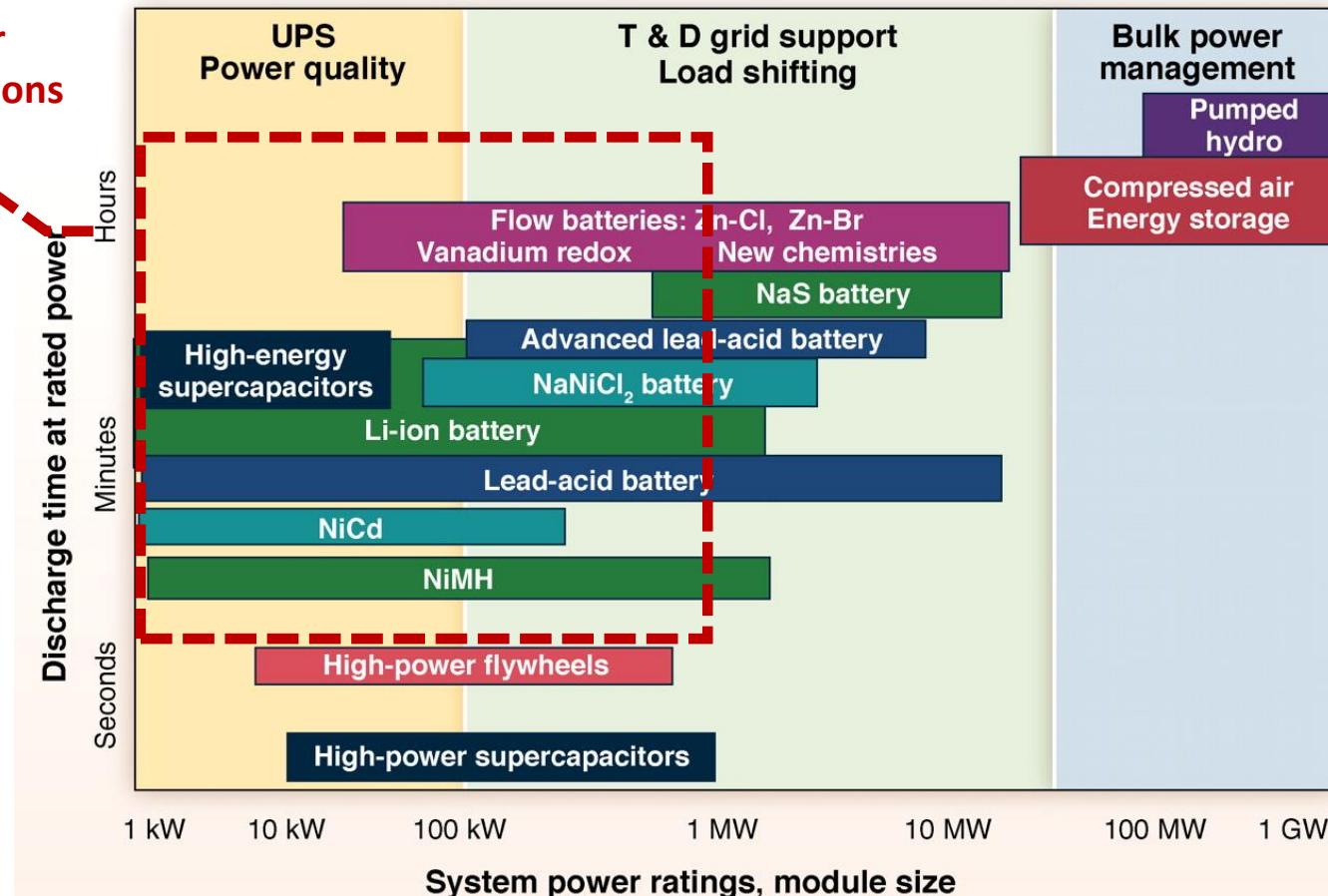
Aplicações de armazenamento de energia – descarga e tamanho

Este gráfico ilustra quais tecnologias de armazenamento de energia combinam com diversas aplicações e serviços.

As tecnologias de armazenamento de energia maiores e mais lentas tendem a ser mais bem combinadas com o fornecimento de energia em massa.

- Embora tecnologias de armazenamento de energia menores e mais rápidas tendam a ser melhores para a qualidade da energia e serviços de suporte à rede.

End-User Applications



Source: EPRI

UPS: fonte de energia ininterrupta

Armazenamento de Energia

Baterias

Armazenamento de energia pode proporcionar às microrredes os mesmos benefícios de outros sistemas conectados à rede.

Também pode fornecer serviços essenciais quando não existe interconexão à rede. Esses serviços incluem:

- Permitir que microrredes operem recursos não emissores de carbono
- Ajudar a conseguir operar apesar de ter ocorrido interrupção de energia, seja por falha ou por rede elétrica em baixa.
- Permitir que a geração distribuída seja sincronizada com ou sem a presença da rede (a geração fotovoltaica requer uma fonte de tensão com a qual sincronizar)
- “Suavizar” o fluxo de energia de fontes intermitentes

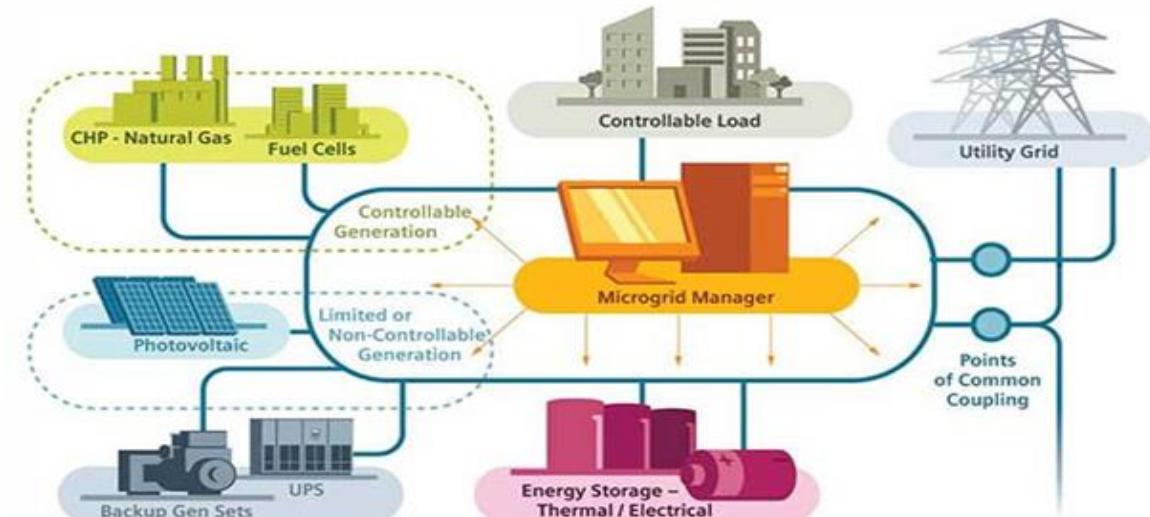


Image source: Siemens, Inc.

Armazenamento é um elemento essencial para qualquer microrrede.

Armazenamento de Energia

Baterias

Aplicações de armazenamento de energia – dispositivo simples de armazenamento de energia elétrica

Toda a operação de armazenamento de energia pode ser separada em três modos distintos:

Carga

- Onde a eletricidade é convertida para o estado armazenado
- Taxa de carga é a taxa de energia elétrica que pode ser convertida e armazenada
- As perdas de conversão podem variar dependendo do método de conversão

Standby

- Onde a energia armazenada é mantida até ser necessária
- Geralmente há perdas em espera, cuja taxa pode variar ao longo do tempo

Descarga

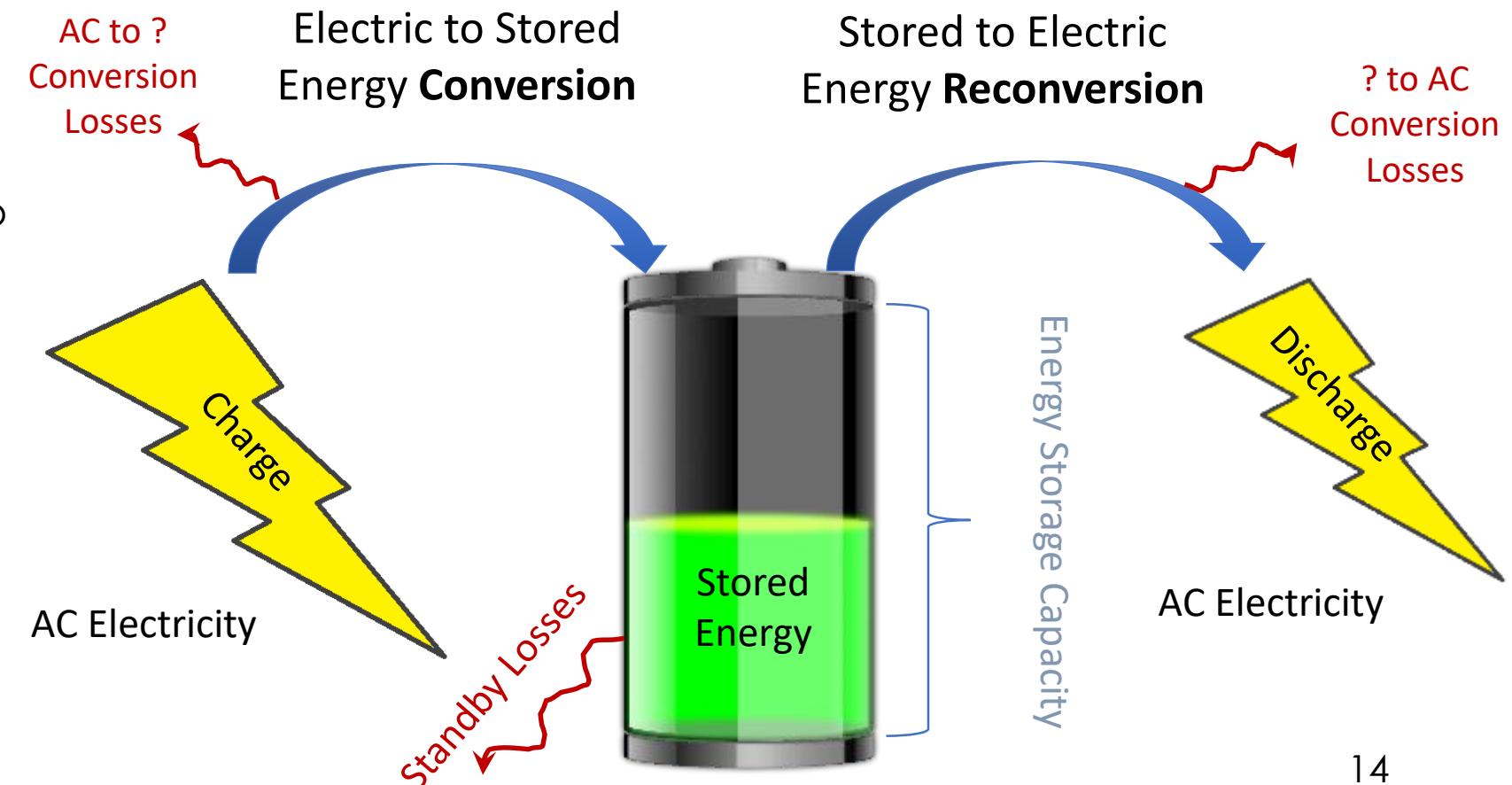
- Onde a energia armazenada é convertida em eletricidade utilizável
- Taxa de descarga é a taxa de energia armazenada que pode ser convertida em energia elétrica e pode não ser a mesma taxa que a taxa de carga
- As perdas de conversão podem variar e podem não ser simétricas com as perdas de conversão de carga

Armazenamento de Energia

Baterias

Aplicações de armazenamento de energia – dispositivo simples de armazenamento de energia elétrica

Ao desenvolver o projeto de integração do sistema, esses parâmetros de desempenho são importantes para modelar e determinar corretamente cada um de seus impactos no desempenho geral



Armazenamento de Energia

Baterias

Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia – “físicos”

Hidráulico

- Armazenamento Hidrelétrico Bombeado

Pneumático

- Armazenamento de energia de ar comprimido

Cinético

- Armazenamento de energia flywheel

Eletromagnético

- Armazenamento de energia magnética supercondutora

Elétrico

- Capacitores

Estas são as principais tecnologias de armazenamento de energia que não são eletroquímicas:

Os **sistemas supercondutores de armazenamento de energia magnética** armazenaam energia no campo magnético criado pelo fluxo de corrente contínua numa bobina supercondutora que foi resfriada criogenicamente a uma temperatura abaixo de sua temperatura crítica supercondutora.

Um **capacitor** (originalmente conhecido como condensador) é um componente elétrico passivo de dois terminais usado para armazenar energia elétrica temporariamente num campo elétrico.

Um **supercapacitor** é um capacitor de alta capacidade com valores de capacitância muito mais altos do que outros capacitores (limites de tensão mais baixos) que preenchem a lacuna entre capacitores eletrolíticos e baterias recarregáveis.

Armazenamento de Energia

Baterias

Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia – “químicos”

Eletroquímico:

- Níquel Cádmio (Ni-Cd)
- Ferro Cromo (Fe-Cr)
- Ião de Lítio (Li-ion)
- Enxofre de Sódio (NaS)
- Chumbo Ácido (LA)
- Zinco - Ar (Zn-ar)
- Cloreto de sódio e níquel (NaNiCl)
- Bateria de fluxo redox de vanádio (VRFB)
- Bateria de fluxo híbrido de brometo de zinco (ZnBr HFB)
-

Eles são definidos principalmente pelos materiais do ânodo, cátodo e eletrólito utilizados, bem como pela sua eletroquímica específica.

EX: as baterias Ni-Cd usam hidróxido de níquel, $\text{Ni}(\text{OH})_2$, para o elétrodo positivo (cátodo), cádmio, Cd, como elétrodo negativo (ânodo) e um eletrólito alcalino de hidróxido de potássio, KOH.

Nobel prize 2019 in chemistry awarded for work on lithium-ion batteries

John B. Goodenough



M. Stanley Whittingham



Akira Yoshino



Armazenamento de Energia

Baterias

Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia – “químicos”

Ião de lítio (Li-ion):

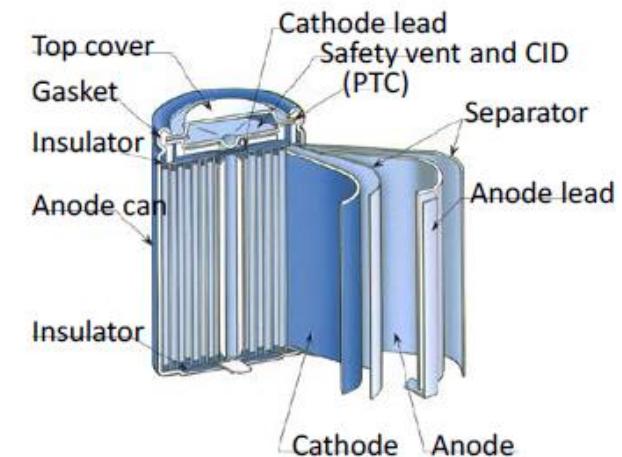
A tecnologia de baterias de Li-ion emergiu como a plataforma de crescimento mais rápido para aplicações de armazenamento estacionário.

As baterias de Li-ion podem ser perigosas em algumas condições e representar um risco à segurança, pois contêm, ao contrário de outras baterias recarregáveis, um eletrólito inflamável (e.g: Lithium hexafluorophosphate) e também são mantidas pressurizadas.

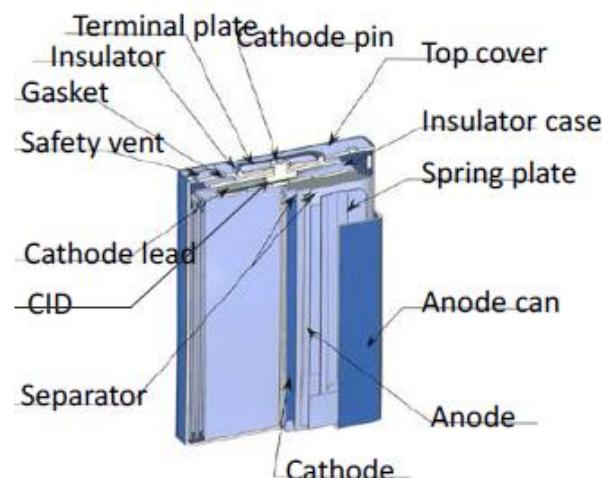
- os padrões de teste para essas baterias são mais rigorosos exigindo uma gama mais ampla de condições de teste e testes adicionais específicos para baterias.

Os tipos mais comuns de células de iões de lítio são células cilíndricas e prismáticas.

Schematic of Cylindrical Cell



Schematic of Prismatic Cell



Armazenamento de Energia

Baterias

Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia – “químicos”

As baterias têm três partes, um ânodo (-), um cátodo (+) e o eletrólito. O cátodo e o ânodo são conectados a um circuito elétrico.

A principal função do separador é evitar o contato físico entre o ânodo e o cátodo, ao mesmo tempo que facilita o transporte de íons na célula. O desafio de projetar separadores de bateria seguros é o compromisso entre robustez mecânica e propriedades de porosidade/transporte.

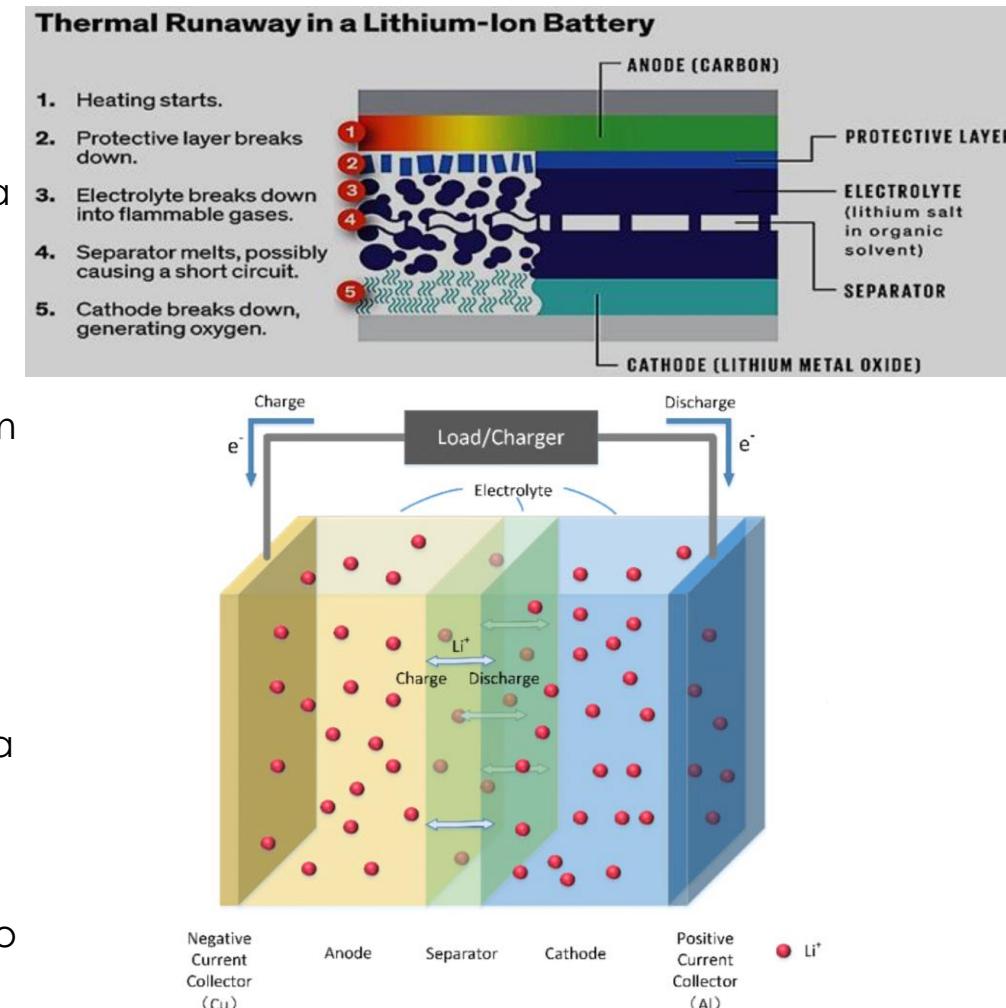
As reações químicas na bateria causam um acúmulo de eletrões no ânodo. Isso resulta numa diferença elétrica entre o ânodo e o cátodo.

- pensar nessa diferença como um acúmulo instável de eletrões. Os eletrões querem se reorganizar e repelam-se e tentam ir para um local com menos eletrões.

Numa bateria, o único lugar para ir é o cátodo. Porém, o eletrólito impede que os eletrões vão direto do ânodo para o cátodo dentro da bateria. Quando o circuito é fechado (um fio conecta o cátodo e o ânodo) os eletrões poderão chegar ao cátodo.

Processos eletroquímicos alteram os produtos químicos no ânodo e no cátodo para fazê-los parar de fornecer eletrões. Portanto, há uma quantidade limitada de energia disponível numa bateria.

Ao recarregar uma bateria, muda-se a direção do fluxo de eletrões usando outra fonte de energia, como painéis solares. Os processos eletroquímicos acontecem ao contrário, e o ânodo e o cátodo são restaurados ao seu estado original e podem novamente fornecer energia.



Armazenamento de Energia

Baterias

Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia – “químicos”

Ião de lítio (Li-ion)

Não se refere a um único emparelhamento eletroquímico, mas a uma ampla variedade de substâncias químicas diferentes.

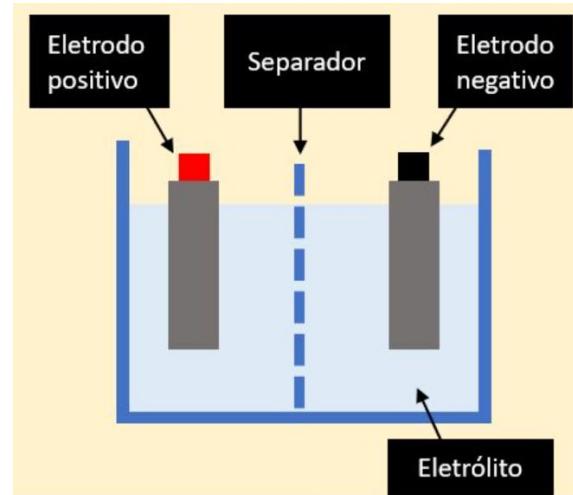
Não contêm lítio metálico; em vez disso, os iões são inseridos na estrutura de outros materiais, como óxidos ou fosfatos metálicos com lítio no elétrodo positivo (cátodo) e carbono (normalmente grafite) ou titanato de lítio no elétrodo negativo (ânodo).

As características químicas, de desempenho, de custo e de segurança variam entre tipos de bateria Li-ion

Os equipamentos eletrônicos portáteis usam principalmente baterias de Li-ion baseadas em óxido de lítio-cobalto (LiCoO_2)

- que oferece alta densidade de energia, mas apresenta riscos à segurança, especialmente quando danificados.

Fosfato de ferro-lítio (LFP), óxido de lítio-manganês (LMO) e óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto (NMC) oferecem menor densidade de energia, mas vidas mais longas e segurança inerente. Esses produtos químicos de bateria são usados em aplicações de armazenamento estacionário.



Armazenamento de Energia

Baterias

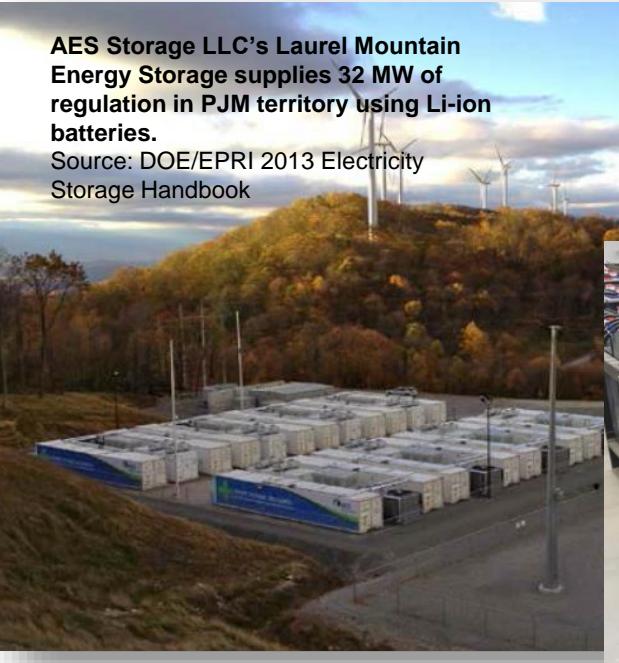
Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia – “químicos”

Ião de lítio (Li-ion)

As baterias recarregáveis de Li-ion de lítio são encontradas em produtos eletrónicos de consumo, que representam a maior parte do volume estimado de produção mundial de 30 GWh por ano. Mas elas também são encontrados em grandes aplicações de armazenamento estacionário.

AES Storage LLC's Laurel Mountain Energy Storage supplies 32 MW of regulation in PJM territory using Li-ion batteries.

Source: DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook



Armazenamento de Energia

Baterias

Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia – “químicos”

Ião de lítio (Li-ion)



#1 Vistra Moss Landing Energy Storage Facility

Location: California, US Developer: Vistra Energy Corporation

Capacity: 750MW / 3 GWh



#2 Manatee Energy Storage Center Project

Location: Florida, US Developer: Florida Power and Light

Capacity: 409MW / 900 MWh

#3 Victorian Big Battery

Location: Australia Developer: Neoen

Capacity: 300 MW / 450 MWh

Read more at: <https://www.saurenergy.com/solar-energy-news/the-top-5-largest-battery-energy-storage-systems-worldwide>

Armazenamento de Energia

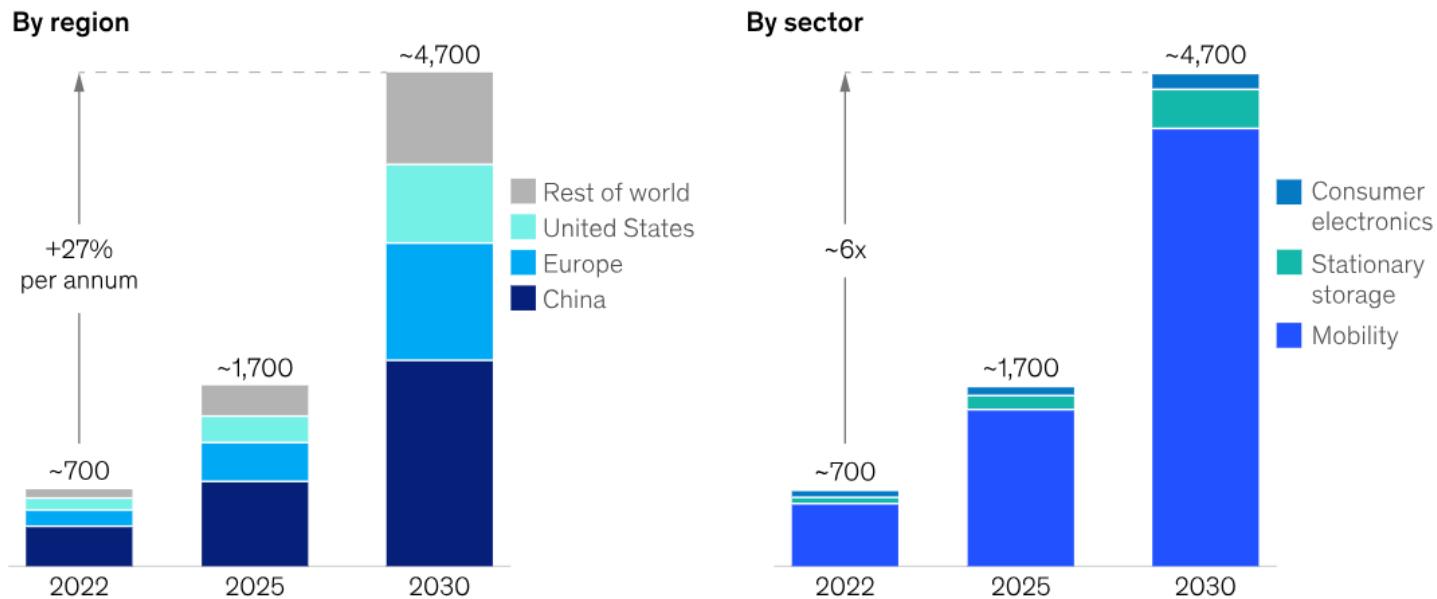
Baterias

Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia – “químicos”

Ião de lítio (Li-ion)

Li-ion battery demand is expected to grow by about 27 percent annually to reach around 4,700 GWh by 2030.

Global Li-ion battery cell demand, GWh, Base case



¹Including passenger cars, commercial vehicles, two-to-three wheelers, off-highway vehicles, and aviation.

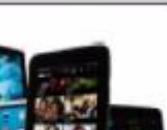
Source: McKinsey Battery Insights Demand Model

Armazenamento de Energia

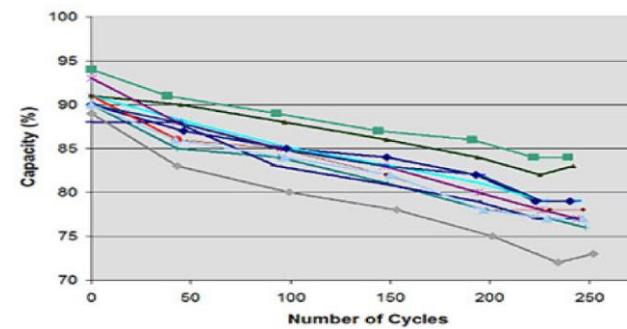
Baterias

Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia – “químicos”

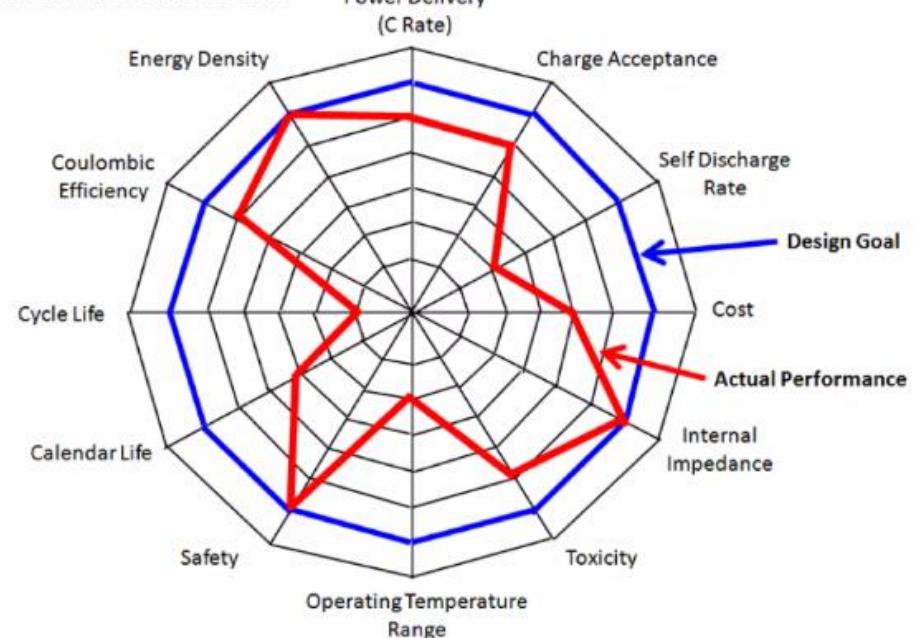
LI-ION CELL APPLICATION MARKET ROADMAP

IoT, MEMS, CMOS memories, Medical implantable	Smart cards, Skin patch, RFID	Wearables, E-textile, Medical device	Smartphone, Tablet, Power tool, Toy	Transport	Large-scale energy storage
Capacity range					
1 mAh	10 mAh	100 mAh	1 Ah	100 Ah	> 1 kAh
Important features					
<ul style="list-style-type: none"> Rechargeable Small footprint, many micro-batteries Long life time Rapid discharge Tend to incorporate with energy harvesting 	<ul style="list-style-type: none"> Can be both disposable and rechargeable Laminar and thin, some with special form factor Relatively low power Cost sensitive 	<ul style="list-style-type: none"> High energy density for small volume Long working hours Flexible, stretchable or thin, some with special form factor High power 	<ul style="list-style-type: none"> Light-weight and small volume Long working hours Some with special form factors High power 	<ul style="list-style-type: none"> Safe Reliable High power High capacity 	<ul style="list-style-type: none"> Cost advantage Long life time Reliable High capacity
 	 	 	 		 
Technology Status					
Small volume production	Available, mostly customized	Prototypes available	Research to prototype	Research	Very early stage

BATTERY SELECTION



Performance Trade-offs



Armazenamento de Energia

Baterias

Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia – “químicos”

A bateria de ião de lítio (LIB) é de longe a bateria química mais promissora, eficiente e de crescimento mais rápido do mercado

- Oferece alta densidade de energia e propriedades mecânicas superiores. Esta bateria continua a escolha preferida para dispositivos miniaturizados.
- O eletrólito desempenha um papel crítico na bateria, pois transfere iões de um elétrodo para outro.

Os eletrólitos devem ter alta condutividade iônica, e estabilidade química e eletroquímica superior.

Os principais critérios de seleção para eletrólitos incluem

- competitividade de custos
- recursos de segurança
- capacidade funcional numa ampla faixa de tensão

Armazenamento de Energia

Baterias

Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia – “químicos”

Eletrólitos para baterias Li-ion são à base de solventes orgânicos*. No entanto, a expulsão de vapores eletrolíticos quentes de uma célula em altas temperaturas e tensões apresenta um risco potencial de explosão.

- Este risco de combustão observado em eletrólitos líquidos é mitigado pelo uso de solventes de baixa inflamabilidade ou aditivos retardadores de chama.
- Além disso, a baixa retenção de carga e as dificuldades operacionais em baixas e altas temperaturas são outros desafios importantes associados aos eletrólitos líquidos.

Para enfrentar esses desafios, a indústria está a progredir:

- eletrólitos de estado sólido, eliminando solventes inflamáveis
 - melhorando a segurança e proporcionando outras vantagens: 100% de materiais na forma sólida



Caminho para a bateria de estado sólido!

Armazenamento de Energia

Baterias

Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia

Eletrolitos sólidos

Advantages

Permit higher energy storage and power capacity

Prevent dendrites (small and finger-like projections) formation and avoids short circuits

Chemical and electrochemical stability from 0 to 6 V (wider voltage range) as compared to other types of electrolytes that have a narrow range from 3 to 5 V

Longer cycle life ($> 50,000$ cycles) as compared to limited cycle life for liquid electrolytes ($< 1,000$ cycles)

Safer to use as risks such as spilling, boiling, and gassing do not exist

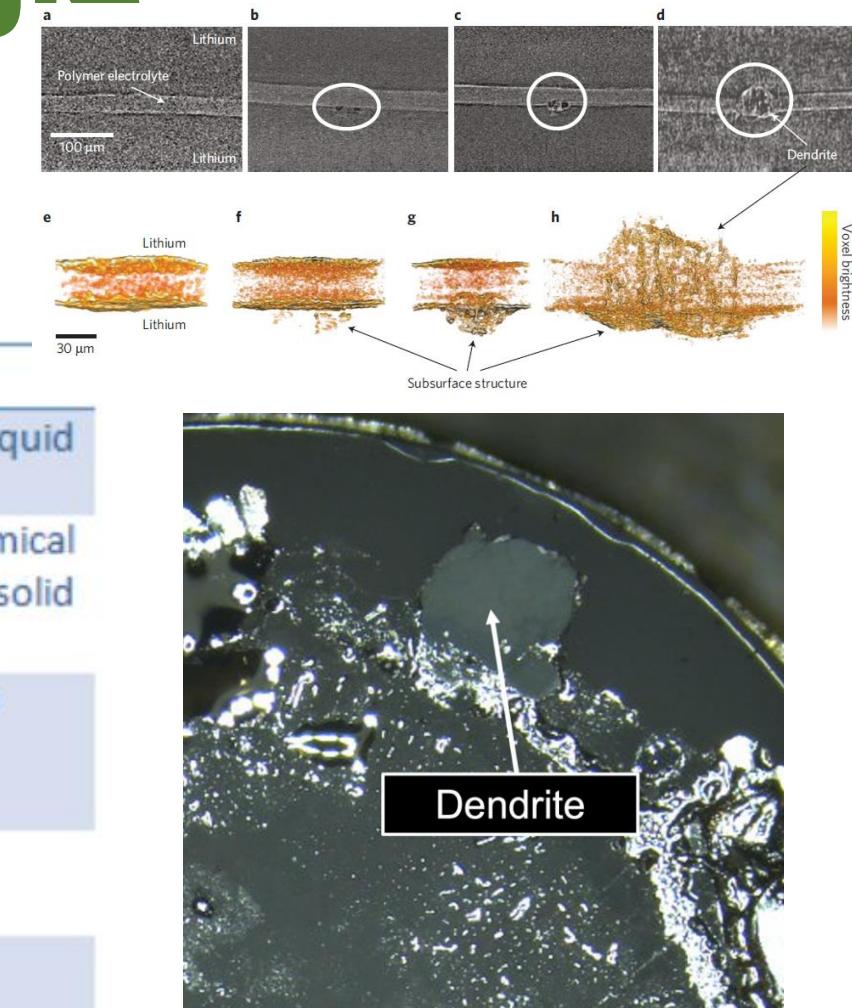
Wider operating temperatures ranging from -40°C to 150°C compared to liquid electrolytes that possess -15°C to 60°C

Disadvantages

Expensive compared to liquid electrolytes

Problems with electrochemical stability observed in some solid electrolytes

Technologies in prototype levels



Formação de Dendritos:

O crescimento de filamentos metálicos dentro de uma bateria que pode causar curtos-circuitos e possíveis falhas.

Armazenamento de Energia

Baterias

Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia

Tipos de eletrólitos sólidos

Inorganic Electrolyte

- Crystalline, amorphous, and mixed phase inorganic materials called superionic conductors
- Types include sulfur, oxide-based garnet type, oxide-based perovskite type, phosphate-based and sulfide-based glassy or glass ceramic type

Solid Polymer Electrolyte

- Lithium salts such as LiClO_4 , $\text{LiN}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2$, LiCF_3SO_3 , or LiBC_4O_8 dissolved in polymers such as poly(ethylene oxide), poly(propylene oxide) or poly(ethylene glycol)

Composites Electrolyte

- Sub-micron to nanoparticles of inorganics dispersed in the polymer matrix
- Ceramic particles (Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 , and BaTiO_3) in poly(ethylene oxide) and lithium salts

Embora alguns protótipos já existam, espera-se que a disponibilidade comercial geral ocorra nos próximos anos

- tecnologia amadurecer
- custos de produção diminuir

Armazenamento de Energia

Baterias

Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia

Algumas figuras de mérito:

A capacidade da bateria é uma medida da quantidade de carga ou energia armazenada na bateria.

$$\text{Energy} = \text{Ah} \times \text{Battery Voltage}$$

As unidades fundamentais de capacidade da bateria são coulombs ($C = A \cdot s$), embora uma unidade mais comum e útil seja Amp-horas (Ah) (amperes = C/tempo , então $\text{Ah} = C/\text{tempo (seg)} \times \text{tempo (horas)}$).

Carga Nominal da bateria (Ah) – É a quantidade de corrente que uma bateria pode fornecer numa hora. Esta é uma especificação muito importante na escolha de uma bateria - proporcional à energia armazenada na bateria.

- Quanto maior for o taxa Ah mais durará a bateria. Para um veículo elétrico as baterias usadas não devem ser abaixo de 20 Ah

Armazenamento de Energia

Baterias

Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia

Algumas figuras de mérito:

A **capacidade da bateria** em Ah pode ser calculada idealmente a partir do peso/volume ou número de moles dos materiais do elétrodo e do eletrólito (se for um componente ativo nas reações redox) da bateria.

Energia específica – é a quantidade total de energia em watt-hora (Wh), que a bateria pode armazenar por quilograma para uma determinada taxa de descarga

- Specific energy = energy/weight = E/m

Densidade energética – é a quantidade de energia (em Wh) que a bateria pode armazenar por unidade de volume numa determinada condição de descarga

- Energy density=energy/volume=E/V

Armazenamento de Energia

Baterias

Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia

Exemplos de exercícios:

1. Calcula a energia de uma bateria alcalina com 1,2 V e uma capacidade de 2100 mAh.

$$E=CxV = 1,2 \text{ V} \times 2,1 \text{ Ah} = 2,5 \text{ Wh}$$

2. Calcula o tempo que se pode ver um vídeo numa televisão de 100 W alimentada por uma bateria de 150 Ah.

$$P=VI$$

$$V=12 \text{ V}, I=100/12 = 8,33 \text{ A}$$

$$\text{Capacidade, } C= \text{ Ah então } I \times t \text{ logo } t=150/8,33= 18 \text{ horas}$$

3. Considera uma bateria de Li-ion de 50g e $C= 3250 \text{ mAh}$ de capacidade. Calcula a energia específica e a densidade energética desta bateria. (Assuma que a tensão é de 3,6V e a bateria é cilíndrica com um diâmetro de 18 mm e altura de 65 mm).

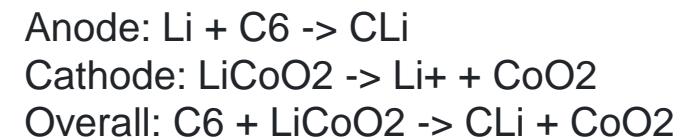
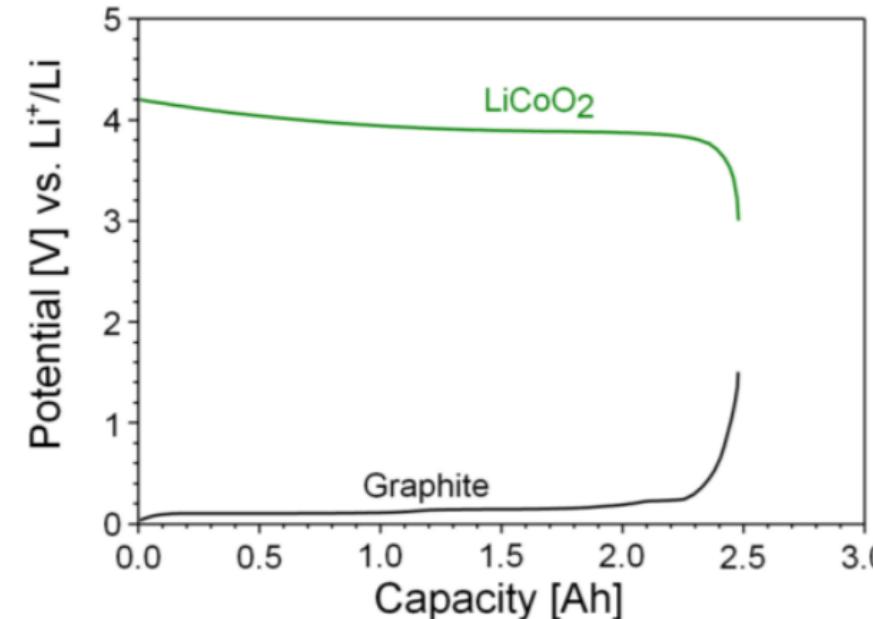
Armazenamento de Energia

Baterias

Tipos de Tecnologias de armazenamento de energia

Exemplo:

4. Observe a figura abaixo. Pretende-se alimentar um pequeno sistema de fecho automático na ISS (20 W) usando uma bateria LiCoO₂/grafite considerando uma capacidade de 2,5 Ah. Considerando que a bateria está totalmente carregada, quanto tempo ela durará?



Armazenamento de Energia

Células de combustível

O hidrogénio é o elemento mais abundante no universo

- Pode-se converter no combustível perfeito.
- Hidrogénio ao ser “queimado” não produz CO₂, produz vapor de água.
 - O seu uso permitiria reduzir drasticamente as emissões responsáveis pelo efeito estufa e pelo aquecimento global.

“PROBLEMA”!

Para obter hidrogénio é necessária energia elétrica, e se esta provém de combustíveis fósseis seriam geradas por emissões.

Por outro lado, **a produção do conhecido como hidrogénio verde baseia-se no uso de energias renováveis para alimentar o processo de eletrólise**, através do qual se obtém hidrogénio a partir da água.

A máquina responsável por esse processo denomina-se eletrolisador.

Armazenamento de Energia

Células de combustível

Eletrolisador:

- **dispositivo capaz de quebrar as moléculas da água em átomos de oxigénio e hidrogénio (processo de cisão)**
- As ligações entre os dois elementos são muito estáveis logo
 - Precisa-se fornecer energia elétrica para que esta divisão ocorra num processo denominado **eletrólise**
 - Ter eletrolisadores eficientes será fundamental para a penetração do hidrogénio nas indústrias e a adoção das células a combustível de hidrogénio.



Um dos maiores eletrolisadores do mundo está localizado em Fukushima (Japão), no mesmo lugar onde ocorreu o conhecido desastre nuclear, **simbolizando uma mudança de paradigma na produção de energia:** alimentado com painéis solares.

Recentemente, em 2021, o eletrolisador japonês foi superado significativamente pelo de Bécancour (Canadá), um dispositivo de membrana polimérica com uma produção de 8,2 toneladas/dia de hidrogénio (Air Liquid)

- capacidade de 20 MW
- evitar a emissão de cerca de **27 000 toneladas/ano de CO₂**, ou seja, as emissões anuais ~10 000 viaturas

Armazenamento de Energia

Células de combustível

Leis da eletrólise

As leis que regem a eletrólise são as leis que relacionam as massas das substâncias produzidas nos eletrodos e as quantidades de energia gastas na eletrólise.

- Essas leis foram estabelecidas pelo físico-químico inglês Michael Faraday, em 1834.

Primeira lei da eletrólise ou Lei de Faraday

"A massa da substância eletrolisada em qualquer dos elementos é diretamente proporcional à quantidade de carga elétrica que atravessa a solução."

$$m = \frac{M I t}{ne F} \quad \text{OU} \quad t = \frac{m ne F}{M I}$$

m – mass; M – molar mass
 I – current (A)
 t = time (s)
 ne – moles of electrons transferred
 F= Faraday's constant

$$M = m/n$$

M = molar mass
 m = mass of a substance (in grams)
 n = number of moles of a substance

A Lei de Faraday fornece uma relação entre corrente, tempo que a corrente flui e a quantidade de material consumido (moles)

$$F = NA \quad q = 96485.309 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1} = 1 \text{ Faraday}$$

Armazenamento de Energia

Células de combustível

Leis da eletrólise

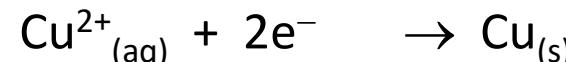
Exemplo:

A quantidade de uma substância produzida ou usada numa célula eletroquímica será determinada pela quantidade de electricidade que flui na célula

Reação cátodo:



1 mole de eletrões produzirá 1 mole de Ag



2 moles de eletrões produzirá 1 mole de Cu

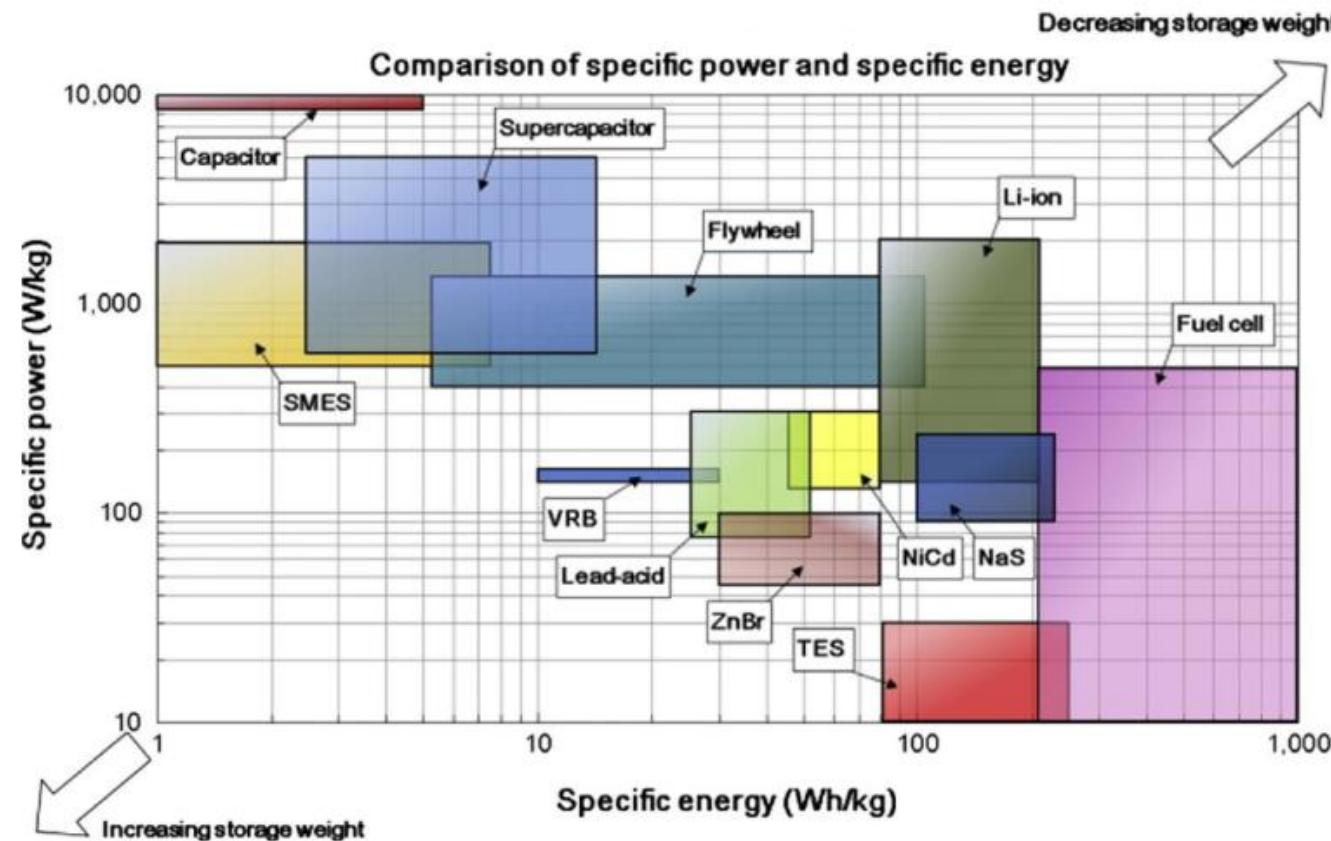
Quantity	Unit
- Potencial	Volt (V)
- Corrente	Ampere (A)
taxa de fluxo de eletrões	
- Capacidade	Coulomb (C)
1 Amp for 1 second	
- Energia	Joules (J)
#Volts × #Coulombs	
1 mole de eletrões = 96500 Coulombs = 1 F	

Armazenamento de Energia

Células de combustível

Células de combustível recebem muita atenção, pode-se combinam células de combustível PEM com outras fontes de energia, incluindo baterias, flywheels e supercapacitores.

Propriedades de potência e energia de diversas fontes de energia:



Armazenamento de Energia

Células de combustível

O princípio/conceito da célula de combustível foi descoberto por William Grove em 1839.

Historia



1839: Sir William Grove



1889: Ludwig Mond



1932: Francis Bacon

1962

1967
1981

- Ele teve a ideia durante as suas experiências sobre electrólise de água, quando imaginou como seria o processo inverso, ou seja reagir hidrogénio com oxigénio para gerar electricidade
- O termo célula de combustível surgiu em 1889, criado por Ludwig Mond e Charles Langer
- Francis Bacon constrói a célula de combustível
- Só passados ~20 anos as células de combustível tiveram a sua primeira aplicação.
- As células de combustível alcalinas passaram a ser usadas em voos da NASA:
 - Missão Gemini (1962)
 - Missão Apollo (1967)
 - Missão Shuttle (1981)

Armazenamento de Energia

Células de combustível

As células de combustível são classificadas principalmente:

- tipo de eletrólito que empregam. Esta classificação determina:
 - tipo de reações eletroquímicas que ocorrem na célula
 - tipo de catalisador necessário
 - a faixa de temperatura na qual a célula opera
 - o combustível necessário

Estas características afetam as aplicações para as quais estas células são mais adequadas

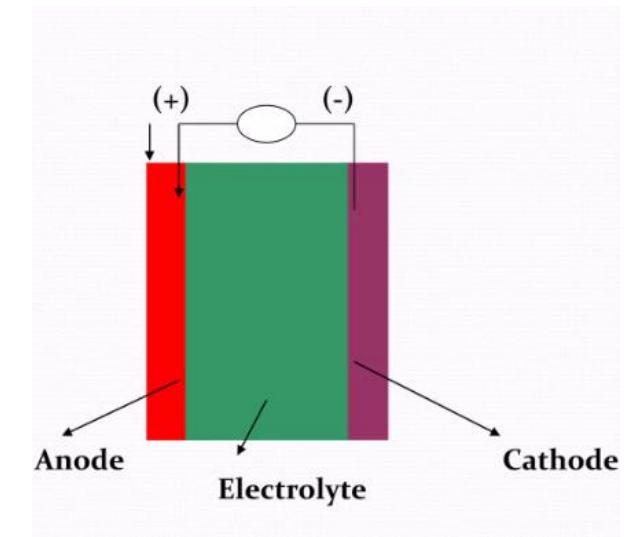
Vários tipos de células de combustível atualmente em desenvolvimento e no mercado, cada uma com suas próprias vantagens, limitações e aplicações potenciais.

Armazenamento de Energia

Células de combustível

O que é uma célula de combustível?

- Qualquer célula tem 2 elétrodos, um positivo e um negativo
 - cátodo e ânodo
 - As reações que produzem eletricidade são dados nos elétrodos.
- Em todas os tipos de células de combustível, hidrogénio é usado como combustível pode ser obtido a partir de qualquer fonte de hidro-carbonos.
- A célula de combustível transforma hidrogénio e oxigénio em potência elétrica, emitindo H₂O como único “resíduo”
- Os dois elétrodos (ânodo e cátodo) imprensam-se em torno de um eletrólito.
 - um elétodo é uma substância que se dissocia em iões na solução e adquire a capacidade de conduzir eletricidade



O combustível é oxidado no ânodo
Oxidante reduzido no cátodo

Armazenamento de Energia

Células de combustível

Como funciona?

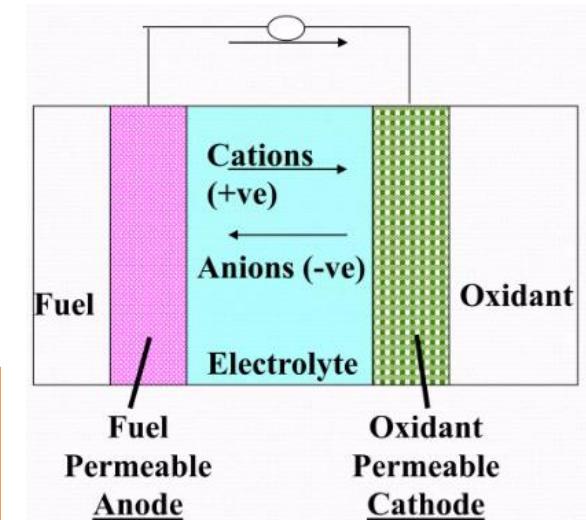
Gera potência elétrica por conversão continua de energia química de um combustível em energia elétrica por meio de uma reação eletroquímica

A célula de combustível por si só não tem partes móveis, fazendo dela uma fonte de energia bastante confiável.

Tipicamente usam hidrogénio como combustível, e oxigénio (normalmente a partir do ar) como o oxidante na reação eletroquímica.

- redução do oxidante (normalmente oxigénio)

O combustível e o gás oxidante fluem para elétrodos opostos, ânodo e cátodo respetivamente, e geram energia eléctrica pela reacção de oxidação electroquímica do combustível (usualmente hidrogénio), e pela reacção de redução do oxidante (normalmente oxigénio)



Armazenamento de Energia

Células de combustível

Como funciona?

Porquê hidrogénio?

O hidrogénio é o combustível escolhido para a maioria das aplicações, devido à sua:

- elevada reactividade quando usados catalisadores adequados
- capacidade de ser produzido a partir de hidrocarbonetos para aplicações terrestres
- elevada densidade energética quando armazenado criogenicamente para aplicações em ambientes fechados, tais como aplicações espaciais

Porquê oxigénio como oxidante?

Está pronto e economicamente disponível através do ar para aplicações terrestres, sendo ainda facilmente armazenado em ambientes fechados.

Armazenamento de Energia

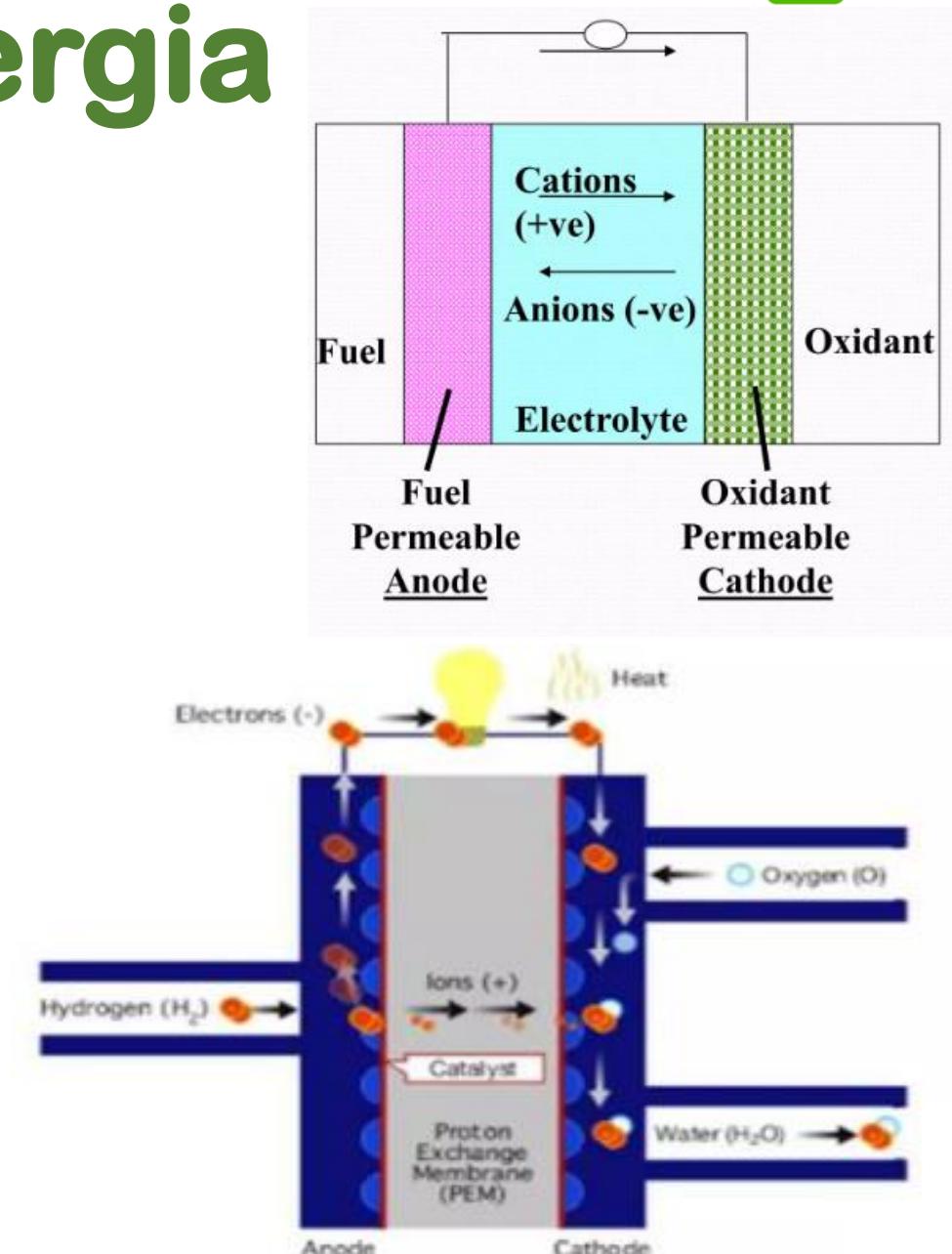
Células de combustível

Como funciona?

Quando o gás de hidrogénio é introduzido no sistema, a superfície do catalisador da membrana divide as moléculas de gás hidrogénio em protões e eletrões.

Os protões passam pela membrana para reagir com o oxigénio (formando água). Os eletrões, que não conseguem passar pela membrana, devem viajar ao redor dela, criando assim a fonte de eletricidade DC.

- O ião H^+ é muito menor e mais móvel que um eletrão, o que significa que pode-se mover muito mais facilmente através do eletrólito
- O eletrão, por outro lado, é muito maior e menos móvel, o que significa que tem mais dificuldade para passar pelo eletrólito.
- Além disso, o eletrólito numa célula de combustível é projetado especificamente para permitir a passagem de ião H^+ , enquanto bloqueia a passagem de eletrões. Esta é uma parte essencial de como uma célula de combustível gera eletricidade.

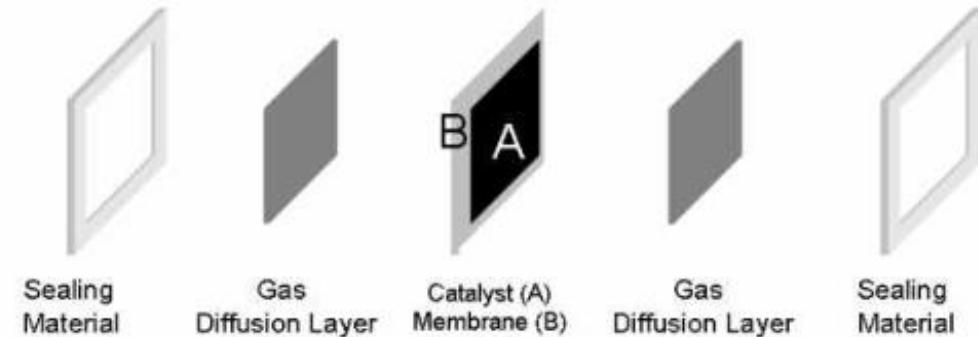
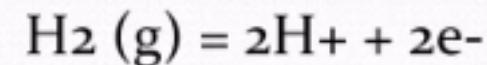


Armazenamento de Energia

Células de combustível

Como funciona?

A reação que ocorre:



Os eletrões libertados a partir do hidrogénio no lado do ânodo não migram através do eletrólito.

- em consequência eles passam através do circuito externo onde chega ao cátodo fazendo o seu trabalho.

Por outro lado, os iões de hidrogénio positivos (H^+) migram através do elétrodo para o cátodo.

No lado do cátodo o átomo de hidrogénio reage com o gás de oxigénio e eletrões para formar água como produto de acordo:



Armazenamento de Energia

Células de combustíve

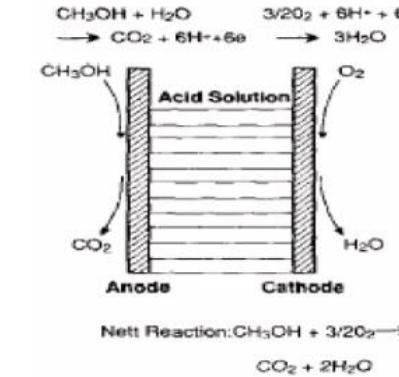
Como funciona?

Ânodo: Parte negativa da célula a combustível. Conduz os eletrões libertados das moléculas de hidrogénio para que possam ser utilizados num circuito externo. Canais gravados dispersam gás hidrogénio sobre a superfície do catalisador

Cátodo: parte positiva da célula. Canais gravados distribuem oxigénio à superfície do catalisador. Conduz eletrões de volta do circuito externo para o catalisador. Recombina com os iões de hidrogénio e oxigénio para formar água.

Eletrólito: Membrana de troca de protões ou outro. Material especialmente tratado, conduz apenas iões carregados positivamente. A membrana bloqueia os eletrões (membrana electrolítica isolada eletronicamente)

Catalisador: Material especial que facilita a reação do oxigénio e do hidrogénio. Normalmente, o pó de platina cobre uma camada muito fina de papel carbono ou tecido. Áspero e poroso maximiza a área de superfície exposta ao hidrogénio ou oxigénio. O lado revestido de platina do catalisador fica voltado para o PEM.

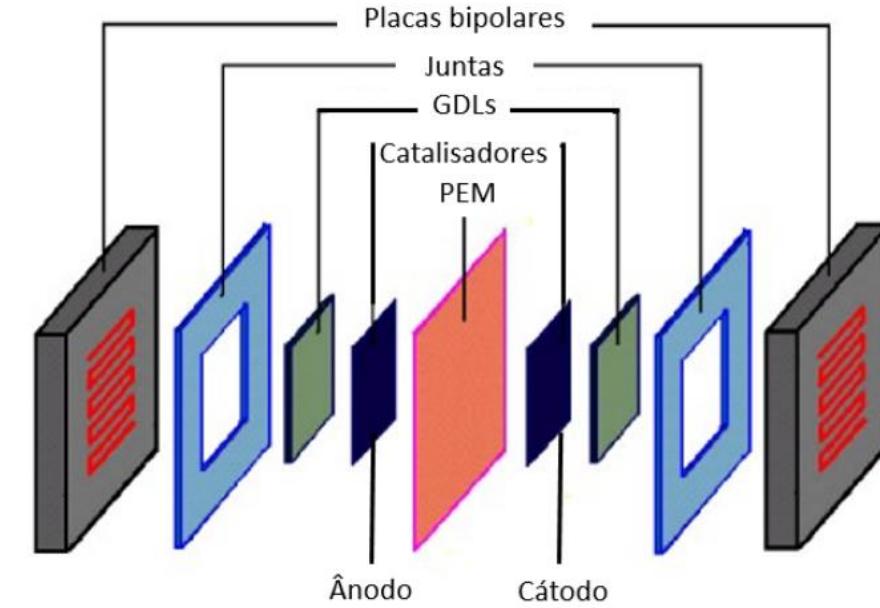


Armazenamento de Energia

Células de combustível

Como funciona - componentes?

- **A célula de combustível usada com mais frequência é a celula de membrana de troca de protões (PEM - Proton Exchange membrane).**
- Estas celulas são essencialmente constituídas por um conjunto de elétrodos de membrana (MEA - Membrane Electrode Assembly). Por sua vez, este conjunto engloba uma membrana polimérica que permite a condução de protões, impossibilitando a travessia pelo eletrodo de eletrões e outras partículas indesejadas nas reações químicas.
- Apresenta também duas camadas catalisadoras de platina, uma em cada lado da membrana, que funciona como ânodo e cátodo.
- Em cada extremidades, possui ainda camadas de difusão de gás (GDLs - Gas Difusion Layers) que ajudam tanto no transporte dos reagentes para a camada superficial como na remoção da água do produto.
 - As GDLs são geralmente feito por fibras de carbono parcialmente revestidas com politetrafluoretileno (PTFE).
- Aliada à MEA, existem com componentes de hardware tais como as juntas, que permitem evitar fugas de gases
- Placas bipolares que atuam no fornecimento de hidrogénio e oxigénio no lado do ânodo e do cátodo, respetivamente

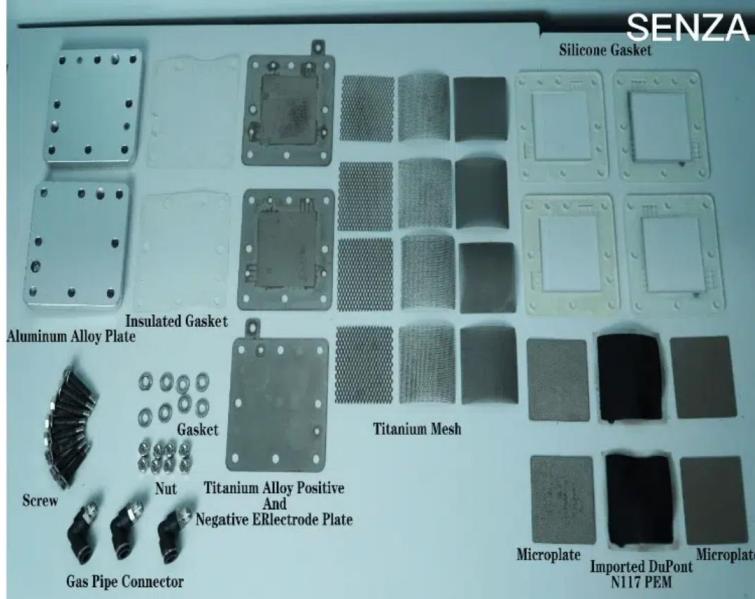


Armazenamento de Energia

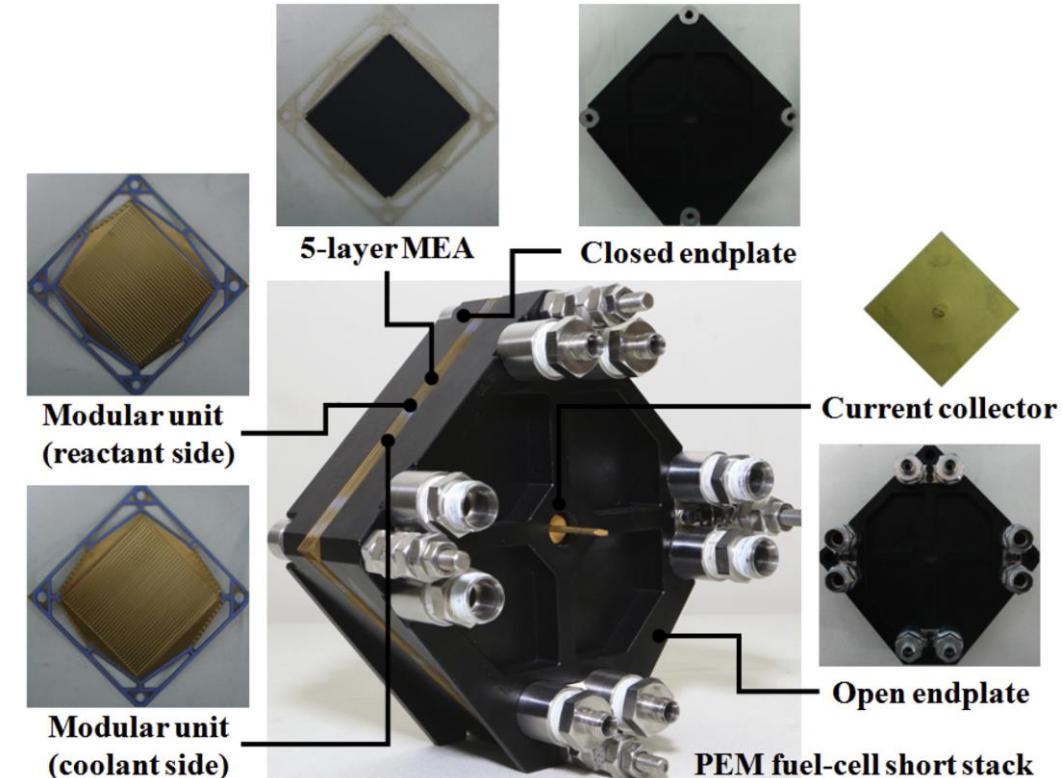
Células de combustível

Como funciona? Diferentes tipos de PEM construídas

- 2. Insulated gasket
- 3. Titanium alloy positive and negative electrode plate
- 4. Titanium mesh
- 5. Silicone gasket
- 6. Microplate
- 7. Imported DuPont N117 PEM
- 8. Screw
- 9. Gasket
- 10. Nut
- 11. Gas pipe connector



Prepare required parts



Armazenamento de Energia

Células de combustível

Vantagens

- **Zero emissões:** só emite vapor de água. Sem poluição do ar (puro H₂). Sem poluição sonora
- **Alta eficiência:** convertem energia química diretamente em eletricidade sem necessidade de processo de combustão: conseguir alta eficiência na conversão de energia.
- **Alta densidade energética:** uma alta densidade permite que as células sejam compactas beneficiando de problemas de espaço.
- **Sem necessidade de recarga:** não precisam de processo de carregamento.
- Sem peças rotativas nos principais componentes de hardware

Armazenamento de Energia

Células de combustível

Desvantagens

- Difícil manufatura e difícil armazenar hidrogénio altamente puro
- Tecnologia cara comparada a baterias
 - vários designs em progresso para eliminar problemas
- Pouco mais eficiente que alternativas
- Hidrogénio geralmente criado usando energia poluente (eg. Carvão).
- Para uso automotivo: difícil armazenamento em termos de infraestruturas.

Armazenamento de Energia

Células de combustível

Aplicações

Podem ser usadas:

- fontes de energia em áreas remotas
- Para fornecer fontes de alimentação fora da rede
- Estação de tratamento de águas residuais e aterro
- Smartphones, computadores
- Hospitais, centrais de cartão de crédito
- Carros, aviões, comboios,
- Telecomunicações
- ...

Armazenamento de Energia

Células de combustível

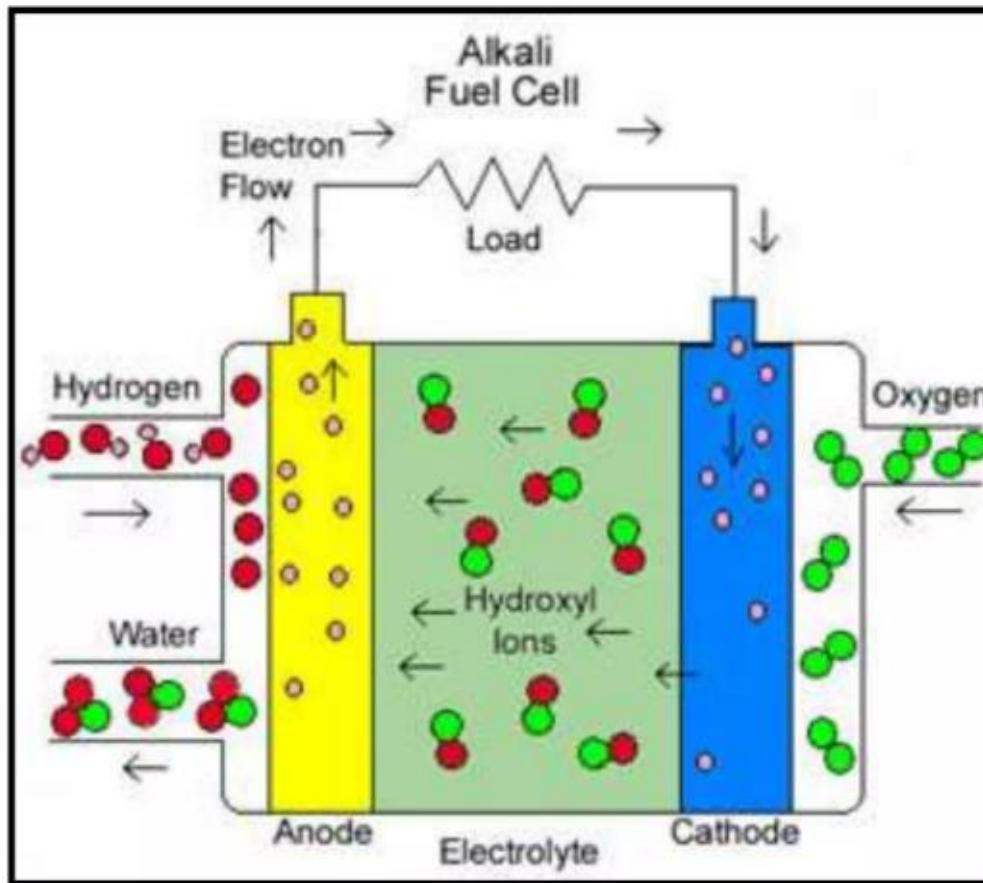
Tipos de células:

- CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL ALCALINAS
- CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE ÁCIDO FOSFÓRICO
- CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE MEMBRANA DE ELETRÓLITO DE POLÍMERO (PEM)
- CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE CARBONATO FUNDIDO
- CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO
- CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE METANOL DIRETO
- ...

Armazenamento de Energia

Células de combustível

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL ALCALINAS



- Este tipo de célula foi introduzida no início dos anos 60.
- Como eletrolito é usado uma solução alcalina aquosa como hidróxido de potássio.
- Usa hidrogénio comprimido e oxigénio
- 60-70% de eficiência
- 150°C – 200°C temperatura de operação
- 300 W a 5 kW requer hidrogénio puro e catalisador de platina

Armazenamento de Energia

Células de combustível

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL ALCALINAS

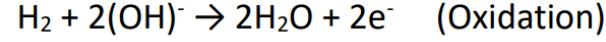
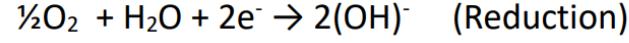
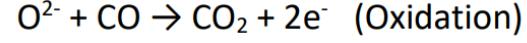
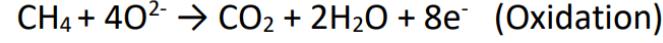
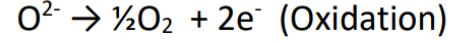
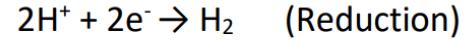
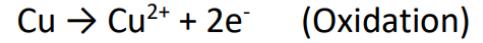
De modo geral, pode-se dizer que numa célula deste tipo, as reacções que ocorrem são:



Os electrões libertados nesta reacção passam através do circuito externo, chegando ao cátodo onde tem lugar a reacção química que origina os iões OH⁻.



O electrólito é uma solução alcalina. As soluções mais comuns são: hidróxido de potássio e hidróxido de sódio, por serem os mais baratos, com elevada solubilidade e não muito corrosivas.



Armazenamento de Energia

Células de combustível

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL ALCALINAS

Vantagens:

- operar com valores de tensão por volta dos 0,875 V;
- baixo custo, no caso dos eléctrodos não são necessários materiais preciosos ou exóticos

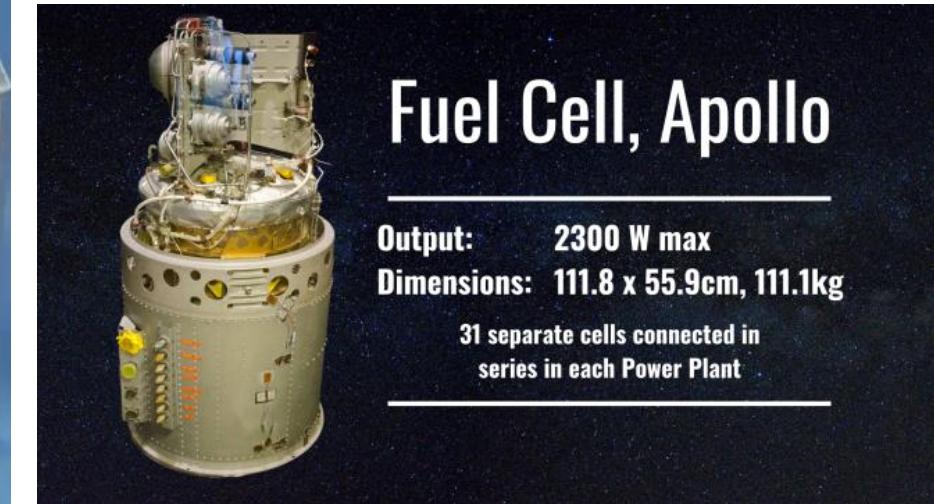
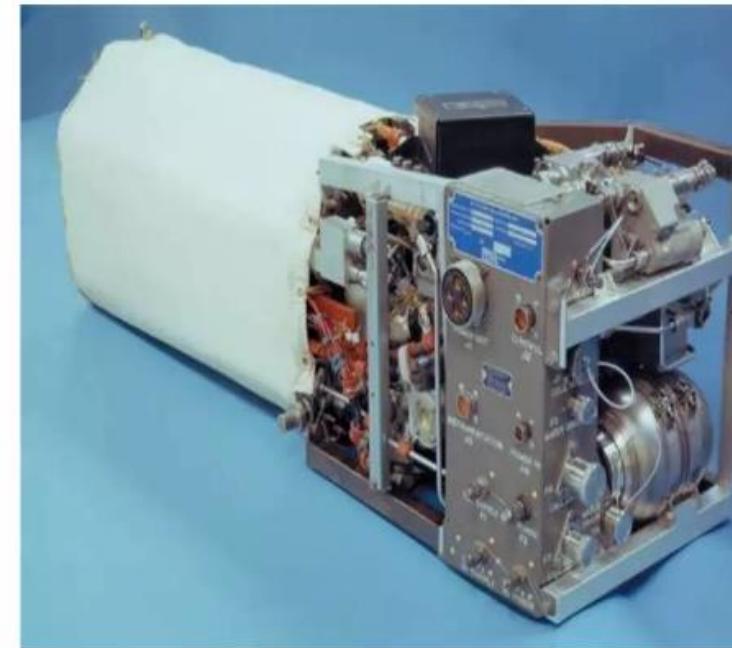
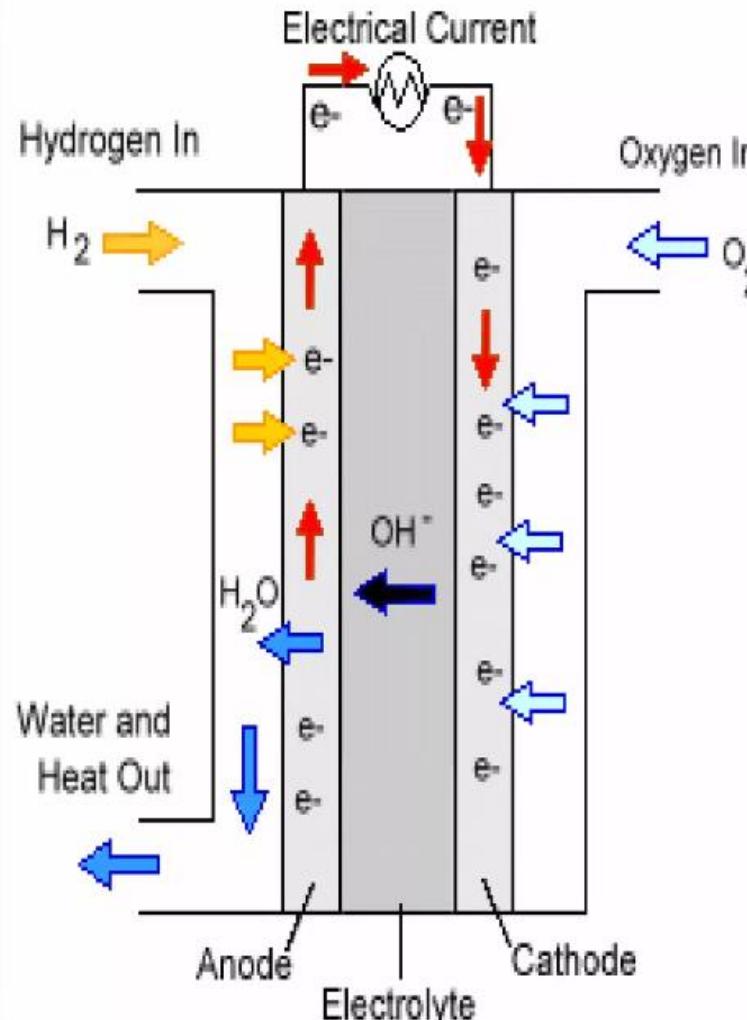
Desvantagens:

- a capacidade de adsorção de CO₂ pelos electrólitos alcalinos usados (NaOH e KOH), que eventualmente reduzem a sua condutividade.
 - Isto implica que para se usar hidrogénio, como combustível, é necessário usá-lo puro, verificando-se o mesmo para o oxidante (ar) cujas impurezas (CO₂) devem ser removidas antes de ser alimentado à célula de combustível.
- resultante das baixas temperaturas de operação são as suas reduzidas velocidades reacção, que podem ser superadas usando eléctrodos porosos contendo platina e operando a pressões elevadas

Armazenamento de Energia

Células de combustível

ALKALINE FUEL CELL

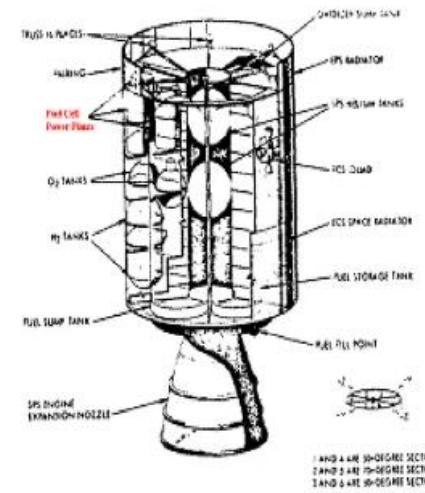
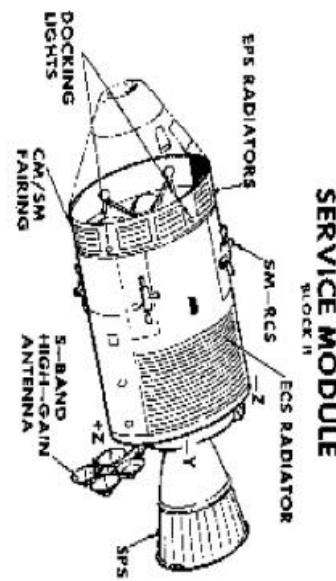


Space Shuttle fuel cell system. From NASA Image Exchange, NASA Johnson Space Center, Photo No. S83-28219.

Armazenamento de Energia

Células de combustível

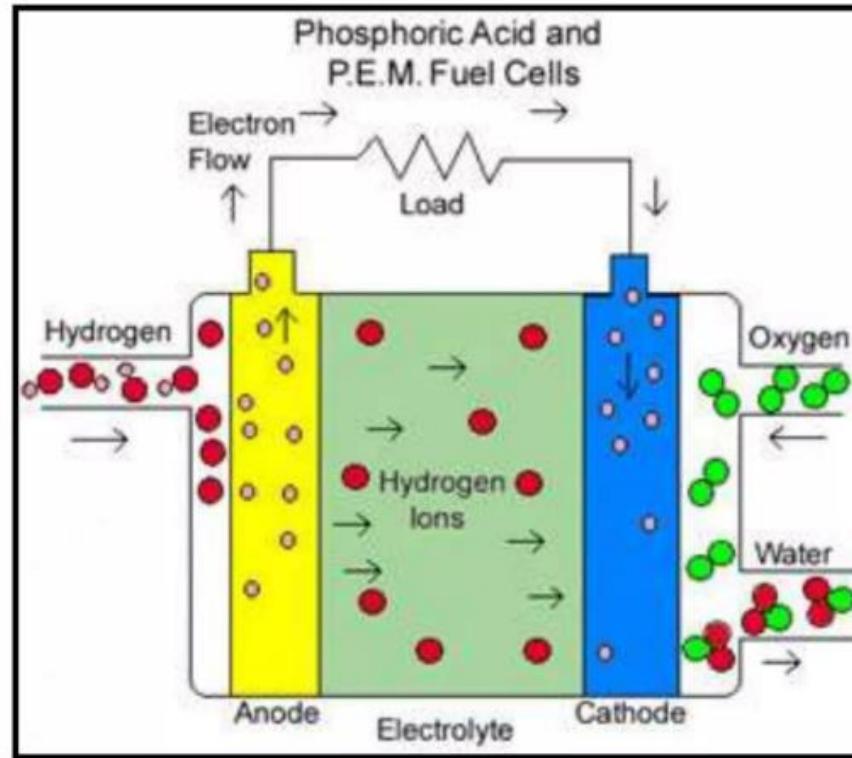
- The alkaline fuel cells are the most used as they are the most efficient and are cheap to manufacture.
- The first alkaline fuel cells were used by NASA in the Apollo missions to provide power as well as provide with potable water for the astronauts.
- The alkaline fuel cell is commercially incubated into a 22 seated hydrogen ship ,power-assisted by an electric motor that gets its electricity from a fuel cell.
- The ship is known as HYDRA,it was used as a ferry boat in GHENT,Belgium.



Armazenamento de Energia

Células de combustível

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL de ácido fosfórico



- O eletrolito é de ácido fosfórico fundido (muito corrosivo)
- Opera a temperaturas até 200°C
- 40 a 80% de eficiência
- 150 – 200 °C temperatura de operação.
- 11 MW testado
- Gasolina sem enxofre pode ser usada como combustível
- Catalisador de platina muito caro

Foram as primeiras produzidas comercialmente, existindo muitas unidades de 200 kW instaladas na Europa e nos Estados Unidos

Armazenamento de Energia

Células de combustível

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE MEMBRANA DE ELETRÓLITO DE POLÍMERO (PEM)

O combustível mais usado nestes casos é hidrogénio puro. Estas células podem usar combustíveis alternativos, que são previamente convertidos em hidrogénio:

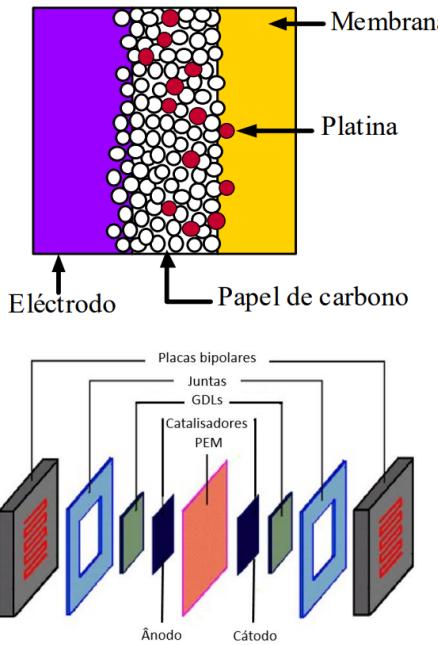
- metanol, etanol, metano, ...

No lado do ânodo o hidrogénio flui para o catalisador onde é dissociado em protões e electrões.

Os protões são conduzidos para o cátodo através de uma membrana electrolítica isolada electronicamente que separa o ânodo do cátodo e os electrões são forçados a percorrer um circuito externo para serem usados como electricidade.

A membrana mais usada é constituída por Nafion ($C_7HF_{13}O_5S \cdot C_2F_4$), que quando humidificada conduz protões do ânodo para o cátodo (quando este material é hidratado, os protões (H^+) tornam-se altamente móveis).

Em cada lado há um eléctrodo de lâmina/papel de carbono revestido com um catalisador normalmente de platina. O catalisador facilita a reacção química. O oxigénio é bombeado do lado do cátodo, reagindo com os electrões que chegam pelo circuito externo para formar água.



Armazenamento de Energia

Células de combustível

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE MEMBRANA DE ELETRÓLITO DE POLÍMERO (PEM)

Exigente humidificação! Devido à exigência de humidificação as temperaturas de operação deste tipo de células são relativamente baixas (inferiores a 100 °C), mesmo trabalhando sob pressão

- é necessário o uso de um catalisador para aumentar a velocidade da reacção. O catalisador usado é a platina, em pequenas quantidades, representando o seu custo uma pequena parte do custo total da célula.
- A platina usada para estas temperaturas é altamente sensível ao “envenenamento” pelo CO, porém tolera o CO₂

A quantidade de electricidade que a célula combustível produz depende

- tamanho
- taxa de fluxo do hidrogénio

A reacção química entre o hidrogénio e o ar produz electricidade, água e calor.

Este último, é produzido em pequenas quantidades, se comparado com o libertado por outras fontes de energia, tais como combustíveis fósseis

Armazenamento de Energia

Células de combustível

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE MEMBRANA DE ELETRÓLITO DE POLÍMERO (PEM)

Membrana!

A membrana deste tipo de células pode ser caracterizada como um electrólito acidificado

- os iões negativos são immobilizados numa matriz polimérica.
- Um bom material para uma membrana para PEM deve ter:
 - alta condutividade iônica (principalmente H⁺)
 - boa estabilidade química e mecânica,
 - baixa permeabilidade à água
 - baixo custo.

Além disso possui propriedades únicas, que tornam possível a sua utilização, permitindo a passagem dos iões de hidrogénio (H⁺) e água, mas não permitindo a passagem das moléculas de hidrogénio e de oxigénio.

Armazenamento de Energia

Células de combustível

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE MEMBRANA DE ELETRÓLITO DE POLÍMERO (PEM)

Membrana! Nafion

Este material requer humidificação para ser condutor de protões.

Devido a esta exigência de humidificação as temperaturas de operação deste tipo de células são relativamente baixas, uma vez que a água não deve evaporar, garantindo-se a humidificação da membrana.

O Nafion é obtido através de um processo de tratamento químico ao polietileno.

- À molécula inicial de polietileno são substituídos os átomos de hidrogénio por átomos de flúor, obtendo-se assim politetrafluoretíleno (usualmente denominado por PTFE).

Para se obter o Nafion é necessário mais um tratamento que consiste na sulfonização (adição do ácido sulfónico $\text{SO}_3\text{-H}^+$) do PTFE, obtendo-se assim uma estrutura que possui numa das pontas um ião SO_3^- , resultando numa molécula que é altamente hidrofóbica.

Armazenamento de Energia

Células de combustível

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE MEMBRANA DE ELETRÓLITO DE POLÍMERO (PEM)

Membrana! Nafion

Vai ser nas zonas onde este comportamento hidrofóbico se manifesta que os iões H⁺ vão ser movidos, sendo por isso importante que a quantidade destas zonas seja a maior possível

- não podendo ser demasiado grande correndo o risco de encharcar a célula

As principais propriedades do Nafion são:

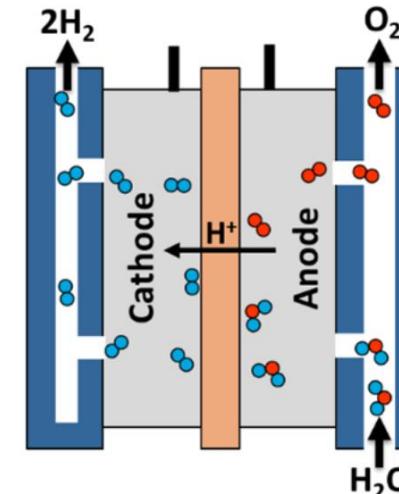
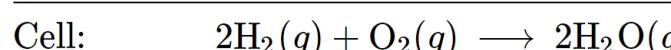
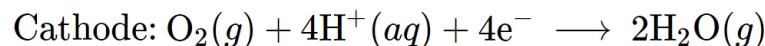
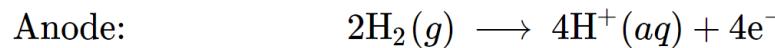
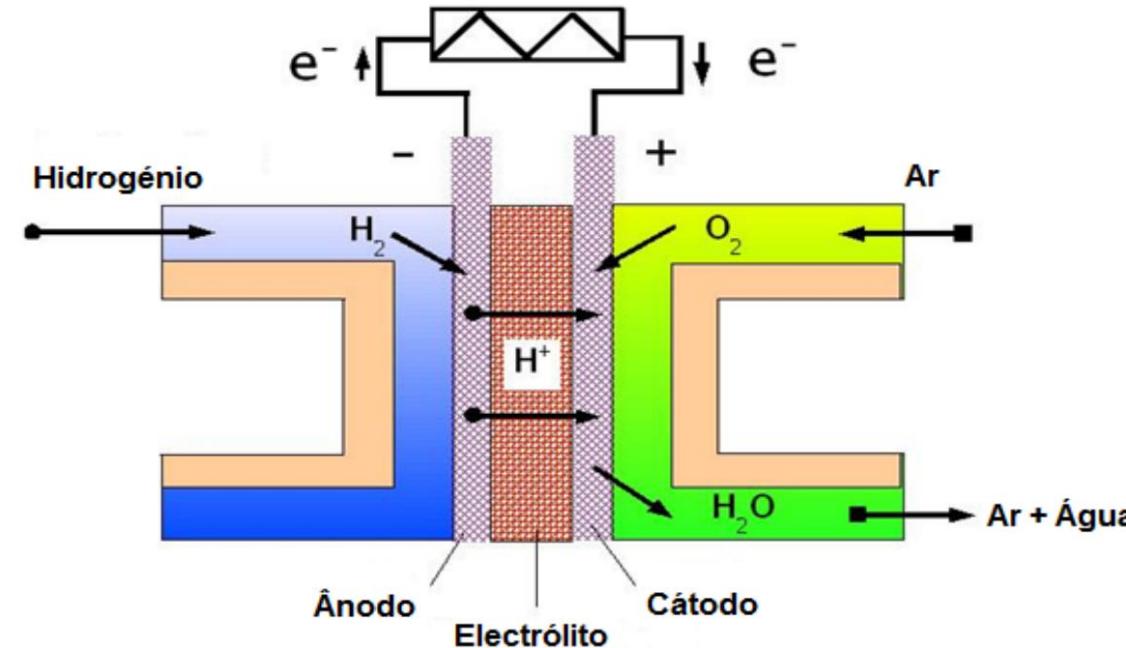
- Boa resistência química;
- Boas características mecânicas permitindo o fabrico de filmes finos, até 50 µm;
- Quando bem hidratados os iões H⁺ podem mover-se com relativa facilidade.

Armazenamento de Energia

Células de combustível

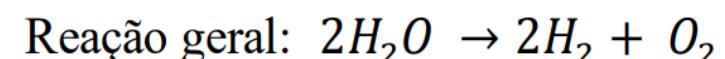
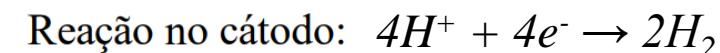
CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE MEMBRANA DE ELETRÓLITO DE POLÍMERO (PEM)

- Eficiência ~ 60%



Entrada de água no ânodo, gera oxigénio, elétrões que atravessam o circuito elétrico e protões que atravessam a membrana e reagem no cátodo, ocorrendo a produção de hidrogénio.

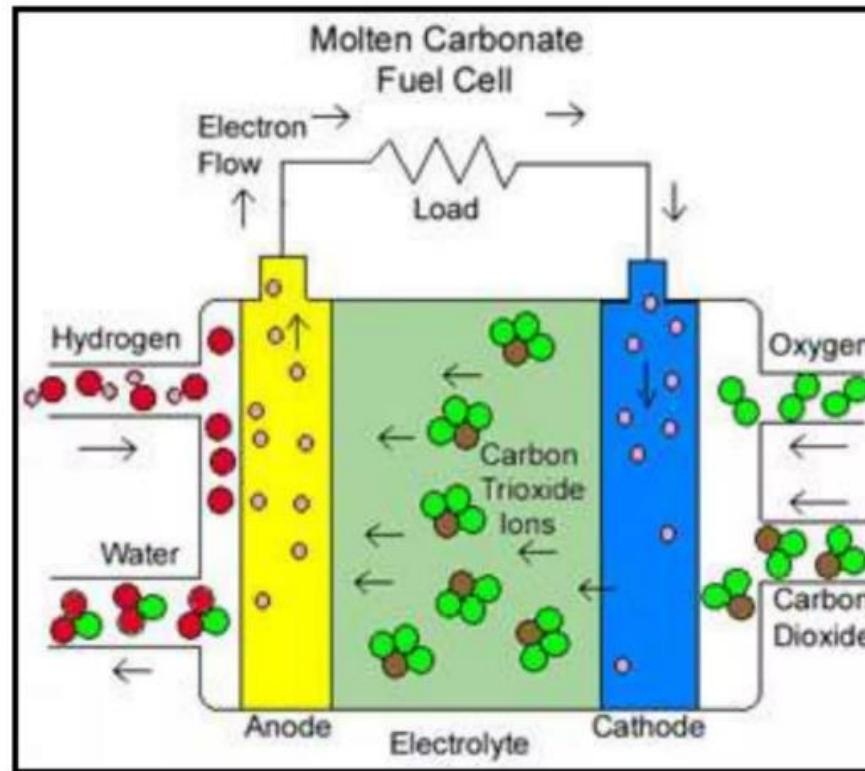
No caso da geração de energia, ocorre o processo inverso.



Armazenamento de Energia

Células de combustível

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL de carbonatos

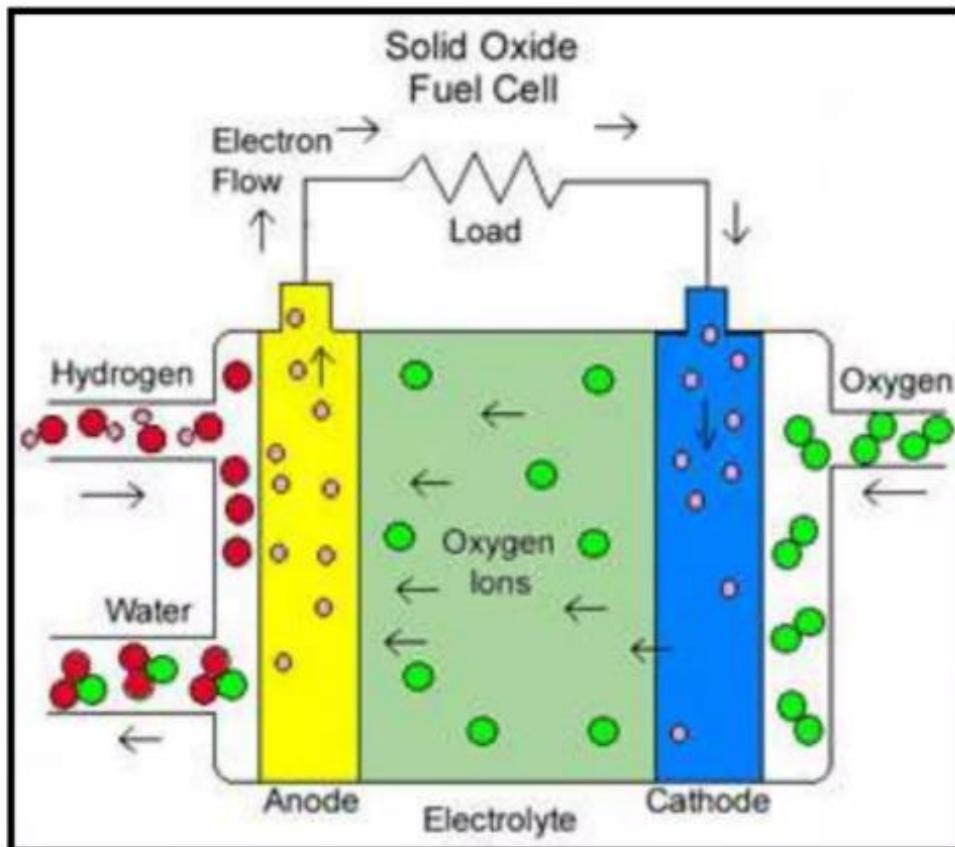


- Carbonatos fundidos como bicarbonato de sódio pode ser usado como eletrolito
- Podem produzir energia até 100 MW
- Podem ser usadas como geradores de alta potencia
- Podem operar a altas temperaturas: até 650 °C
- Eficiência de quase 55%
- Não é cara

Armazenamento de Energia

Células de combustível

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL de óxidos sólidos



- Das mais usadas comercialmente
- Alta capacidade de operação (tempo de vida)
- Operação a ~ 1000 °C
- Versátil: vários produtos de petróleo podem ser usados como combustível.
- Eletrólito de Yttria stabilized zirconia (YSZ)
- Eficiência $\sim 60\%$
- Devido as altas temperaturas de operação:
 - várias reações podem acontecer e pode resultar carbono e grafite no ânodo e danificar e diminuir a eficiência.
 - Em altas temperaturas, o dispositivo pode produzir água na forma de vapor, que pode ser facilmente transportado através de turbinas a vapor para produzir mais eletricidade.

Armazenamento de Energia

Células de combustível

Comparação

Fuel Cell Type	Common Electrolyte	Operating Temperature	Typical Stack Size	Efficiency	Applications	Advantages	Disadvantages
Polymer Electrolyte Membrane (PEM)	Perfluoro sulfonic acid	50-100°C 122-212° typically 80°C	<1kW-100kW	60% transpor- station 35% stationary	• Backup power • Portable power • Distributed generation • Transporation • Specialty vehicles	• Solid electrolyte re-duces corrosion & electrolyte management problems • Low temperature • Quick start-up	• Expensive catalysts • Sensitive to fuel impurities • Low temperature waste heat
Alkaline (AFC)	Aqueous solution of potassium hydroxide soaked in a matrix	90-100°C 194-212°F	10-100 kW	60%	• Military • Space	• Cathode reaction faster in alkaline electrolyte, leads to high performance • Low cost components	• Sensitive to CO ₂ in fuel and air • Electrolyte management
Phosphoric Acid (PAFC)	Phosphoric acid soaked in a matrix	150-200°C 302-392°F	400 kW 100 kW module	40%	• Distributed generation	• Higher temperature enables CHP • Increased tolerance to fuel impurities	• Pt catalyst • Long start up time • Low current and power
Molten Carbonate (MCFC)	Solution of lithium, sodium, and/or potassium carbonates, soaked in a matrix	600-700°C 1112-1292°F	300 kW-3 MW 300 kW module	45-50%	• Electric utility • Distributed generation	• High efficiency • Fuel flexibility • Can use a variety of catalysts • Suitable for CHP	• High temperature cor-rosion and breakdown of cell components • Long start up time • Low power density
Solid Oxide (SOFC)	Yttria stabilized zirconia	700-1000°C 1202-1832°F	1 kW-2 MW	60%	• Auxiliary power • Electric utility • Distributed generation	• High efficiency • Fuel flexibility • Can use a variety of catalysts • Solid electrolyte • Suitable for CHP & CHHP • Hybrid/GT cycle	• High temperature cor-rosion and breakdown of cell components • High temperature opera-tion requires long start up time and limits

Armazenamento de Energia

Células de combustível

International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy 2 (2012) 15-27

Comparação

Table 1. Fuel Cell Types

Fuel Cell	Electrolyte Used	Operating Temperature	Electrode reactions
Phosphoric acid (PAFC)	Phosphoric acid	150-200 °C	Anode reaction: $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$ Cathode reaction: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
Polymer exchange membrane (PEMFC)	Polymer Membrane	70-100 °C typically 80 °C	
Alkaline (AFC)	Potassium Hydroxide	65-100 °C	Anode reaction: $2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^-$ Cathode reaction: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$
Direct methanol (DMFC)	Polymer Membrane	30-80 °C	Anode reaction: $CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$ Cathode reaction: $\frac{3}{2}O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$
Solid oxide (SOFC)	Yittria Stabilized Zirconia	600-1000 °C	Anode reaction: $2H_2 + 2O^{2-} \rightarrow 2H_2O + 4e^-$ Cathode reaction: $O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$

Armazenamento de Energia

Células de combustível

Armazenamento do Hidrogénio – o desafio!

Os átomos de hidrogénio são os mais leves e menores de todos os elementos.

Por esta razão, é muito difícil evitar que o hidrogénio escape de ambientes confinados, como tanques ou tubagens.

Uma vez que é necessário fazer um “esforço” (ou seja, trabalho) para manter o hidrogénio armazenado, armazená-lo implica perder eficiência.

Alguns métodos de armazenamento:

- Cilindros de Pressão: Alguma eficiência é perdida no processo de compressão
- Hidrogénio Líquido: requer a redução da temperatura do hidrogénio para 20,39 K. Esse processo já reduz 1/3 da eficiência.
- Hidretos Metálicos: São compostos de hidrogénio e magnésio, titânio e outros metais. A eficiência é baixa a média e muito calor é gerado quando o hidrogénio é libertado, mas esses compostos são muito fáceis de armazenar
- Nanofibras de carbono: Nova tecnologia.

Armazenamento de Energia

Células de combustível

Education

At Fuel Cell Store, our mission is to empower the next generation with a passion for science and clean energy, for a brighter future. We offer a variety of fun, engaging and most importantly, educational products demonstrating fuel cell, hydrogen, solar, hydroelectricity, wind and bio-energy technologies.

All of the educational kits we supply are designed to teach and promote interest in sustainable energy in an effort to "go green" for our environment. Encompass the big picture and spark curiosity with scientific applications and potential solutions to real world issues. We help you understand the growing need for renewable energy sources.

All of our kits are strongly STEM (Science, Technology, Engineering, Math) focused and some come with Next Generation Science Standards (NGSS), Common Core English Language Arts Standards, and Common Core Math Standards codes. We even provide teaching curriculums and student worksheets for selected products.



We also offer kit accessories to add to your existing experiments. We have a wide selection of tubing, wires, solar panels, fuel cell loads, and more! Come find the perfect educational product that fits your budget and your needs!

REFINE SEARCH



Display: Sort By: Default Show: 15



Dual Axis "Smart" Solar Tracker
\$150.00

[Add to Cart](#)

Junior Basic
\$262.00

[Add to Cart](#)

MudWatt Microbial Fuel Cell Kit
\$39.99

[Add to Cart](#)

Solar DIY Fan Kit
\$16.50

[Add to Cart](#)

Tutorial Basic
\$334.00

[Add to Cart](#)



Tutorial Pro
\$525.00

[Add to Cart](#)

1-Cell Rebuildable PEM Electrolyzer Kit
\$200.00

[Add to Cart](#)

1-Cell Rebuildable PEM Fuel Cell Kit
\$130.00

[Add to Cart](#)

2 Volt Battery With Charger
\$42.00

[Add to Cart](#)

2V/600mA Solar Panel
\$10.50

[Add to Cart](#)

<5W Fuel Cell Stacks

Display: Sort By: Default Show: 15



Double Reversible Fuel Cell H2/O2/Air
\$90.00

[Add to Cart](#)

Double Fuel Cell H2/O2
\$90.00

[Add to Cart](#)

Double Fuel Cell H2/O2/Air
\$90.00

[Add to Cart](#)

Fuel Cell H2/O2
\$70.00

[Add to Cart](#)

Fuel Cell H2/O2/Air
\$61.00

[Add to Cart](#)



Quattro Fuel Cell H2/O2/Air
\$140.00

[Add to Cart](#)

Reversible Fuel Cell H2/O2/Air
\$80.00

[Add to Cart](#)

Fuel Cell Stack 3
\$200.00

[Add to Cart](#)

Fuel Cell Stack 5
\$280.00

[Add to Cart](#)

Fuel Cell Stack 10
\$525.00

[Add to Cart](#)



Methanol Fuel Cell

[Request a Quote](#)

Armazenamento de Energia

Células de combustível

1kW to 6kW Fuel Cell Stacks

Display:  Sort By: Default Show: 15

 GreenHub 2 - 3000 From \$26,233.00 Add to Cart	 GreenHub 2 - 5000 From \$45,556.00 Add to Cart	 GreenHub 2 PRO 2000 From \$20,275.00 Add to Cart	 GreenHub 2 PRO 3000 From \$28,520.00 Add to Cart	 GreenHub 2 PRO 5000 From \$47,501.00 Add to Cart
 G-HFCS-1kW36V (1kW Hydrogen Fuel Cell Power Generator) \$6,219.00 Add to Cart	 G-HFCS-2kW25V (2kW Hydrogen Fuel Cell Power Generator) \$11,424.00 Add to Cart	 G-HFCS-3kW48V (3kW Hydrogen Fuel Cell Power Generator) \$14,551.00 Add to Cart	 G-HFCS-5kW66V (5kW Hydrogen Fuel Cell Power Generator) \$22,312.00 Add to Cart	 G-HFCS-5kW72V (5kW Hydrogen Fuel Cell Power Generator) Request a Quote
 G-HFCS-6kW (6kW Hydrogen Fuel Cell Power Generator) \$27,062.00 Add to Cart				

Armazenamento de Energia

Células de combustível

PEM Fuel Cells for Drones, UAVs, and Robotics

Is your UAV ready to dominate the skies? Want to fly longer or fly further? Conventional rechargeable batteries such as LiPo batteries are heavy, have already hit their limits for their energy density, and are not providing longer flight times. We are bringing you the ultra-lightweight fuel cell based power generators to achieve long flights for further distances. Hydrogen powered PEM fuel cells are energy dense, highly efficient, and lightweight.

Furthermore, hydrogen is the lightest fuel available to mankind and yet one of the most energy dense fuel. No compromise on the safety because there is a decade of scientific research behind the fuel cell system. Combination of PEM fuel cell and hydrogen fuel provides the best of the both worlds and enables long flight time for any UAVs. Recent investigations shows that 2X to 6X improvement can be achieved depending on the UAV platform and hydrogen storage tank compared to the same weight of LiPo batteries.

FuelCellStore proudly presents various fuel cell systems for your drone, UAV, and robotics applications and all other small unmanned aircraft platforms. In this category, you will find lightweight or ultra-lightweight fuel cell systems with the electrical power generation rate of up to 2kW for various unmanned aircraft platforms. These power generators can also be used for other sensor applications that needs 24/7 off-grid power for them to be energy autonomous.

Display:					Sort By: Default		Show: 15		
	Protium-25 \$1,951.00 Add to Cart		Protium-50 \$2,323.00 Add to Cart		Protium-150 \$5,676.00 Add to Cart		Protium-300 \$7,302.00 Add to Cart		G-HFCS-200W15V (200 W Hydrogen Fuel Cell Power Generator) \$2,178.00 Add to Cart
	G-HFCS-300W12V (300 W Hydrogen Fuel Cell Power Generator) \$2,843.00 Add to Cart		G-HFCS-600W24V (600 W Hydrogen Fuel Cell Power Generator) \$4,319.00 Add to Cart		G-HFCS-1kW36V (1kW Hydrogen Fuel Cell Power Generator) \$6,219.00 Add to Cart		G-HFCS-2kW25V (2kW Hydrogen Fuel Cell Power Generator) \$11,424.00 Add to Cart		G-HFCS-3kW48V (3kW Hydrogen Fuel Cell Power Generator) \$14,551.00 Add to Cart
	G-HFCS-5kW66V (5kW Hydrogen Fuel Cell Power Generator) \$22,312.00 Add to Cart		G-HFCS-5kW72V (5kW Hydrogen Fuel Cell Power Generator) Request a Quote		G-HFCS-6kW (6kW Hydrogen Fuel Cell Power Generator) \$27,062.00 Add to Cart		P250i (250 W Solid Oxide Fuel Cell Power Generator) Request a Quote		D350XR (350 W Solid Oxide Fuel Cell Power Generator) Request a Quote

Armazenamento de Energia

Células de combustível

Fuel Cell Stacks

A single fuel cell consists of a membrane electrode assembly (MEA) and two flow-field plates delivering about 0.5 and 1V voltage (too low for most applications). Just like batteries, individual cells are stacked to achieve a higher voltage and power. This assembly of cells is called a fuel cell stack, or just a stack.

The power output of a given fuel cell stack will depend on its size. Increasing the number of cells in a stack increases the voltage, while increasing the surface area of the cells increases the current. A stack is finished with end plates and connections for ease of further use.

Below you will find many stacks that can easily be integrated into a system to provide an operational power system tailored for most specific applications. We even offer DIY and build it yourself fuel cell stacks and kits.





Double Reversible Fuel Cell H2/O2/Air

\$90.00

★★★★★

[Add to Cart](#)



Direct Methanol Fuel Cell Flex-Stak

From \$317.00

★★★★★

[Add to Cart](#)



Flex-Stak Kit

From \$450.00

★★★★★

[Add to Cart](#)



Flex-Stak Assembled

From \$229.00

★★★★★

[Add to Cart](#)



Flex-Stak Electrochemical Cell

From \$281.00

[Add to Cart](#)

REFINE SEARCH



<5W Fuel Cell Stacks 5W to <100W Fuel Cell Stacks 100W to <1kW Fuel Cell Stacks 1kW to 6kW Fuel Cell Stacks



PEM Fuel Cells for Drones, UAVs, and Robotics Fuel Cell Stack Accessories Portable Generators



Flow Battery Flex-Stak

\$927.00

★★★★★

[Add to Cart](#)



Protium-25

\$1,951.00

[Add to Cart](#)



Protium-50

\$2,323.00

[Add to Cart](#)



GreenBox 2 - 100

From \$5,720.00

[Add to Cart](#)



Protium-150

\$5,676.00

[Add to Cart](#)

Armazenamento de Energia

Células de combustível

NASA conseguiu gerar oxigénio em Marte

A agência refere que um instrumento a bordo do Perseverance conseguiu gerar oxigénio suficiente para que um cão pequeno pudesse respirar durante dez horas.



© Twitter / @NASAJPL



08:19 - 18/09/23 POR MIGUEL DIAS
TECH ESPAÇO

Um pequeno dispositivo instalado no rover Perseverance - de nome Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization Experiment (ou MOXIE) - permitiu à NASA provar que é possível gerar oxigénio a partir da atmosfera de Marte composta por grandes quantidades de dióxido de carbono.

A notícia foi partilhada pela NASA por via de uma publicação na rede social X (ou Twitter), onde a agência espacial norte-americana sublinha a importância deste avanço. **“Esta tecnologia pode abrir caminho para que futuros exploradores façam o seu próprio combustível de foguetões ou ar respirável”**, pode ler-se no ‘tweet’ partilhado pela NASA.

MOXIE adquire, comprime e aquece gases atmosféricos marcianos usando um filtro HEPA, em seguida, divide as moléculas de CO₂ em O e monóxido de carbono (CO) usando óxido sólido em eletrólise, onde os átomos de O se combinam para formar O₂ gasoso.

O processo de conversão requer uma temperatura de ~800 °C. Uma célula de eletrólise de óxido sólido funciona com base no princípio de que, em temperaturas elevadas, certos óxidos cerâmicos, como zircónia estabilizada com ítria (YSZ) e céria dopada, tornam-se condutores de iões óxido (O₂⁻). Um disco fino e não poroso de YSZ (eletrólito sólido) é imprensado entre dois eletrodos porosos.

Armazenamento de Energia

Células de combustível

Exercícios:

5) Considere uma produção desejada de 2 MW e o ponto de operação desejado de 600 mV e 400 mA/cm².

- Quanta área de célula de combustível necessária?
- Assumindo uma área de célula de combustível de 1 m² e 280 células por conjunto (stack), quantos conjuntos são necessários para esta unidade de 2 MW?

6) Considere um dispositivo eletrónico portátil na ISS que consome 1 A de corrente a uma tensão de 2,5 V.

- Qual é a potência requisitada para o dispositivo?
- Projetou-se uma célula de combustível que fornece 1 A a 0,5 V. Quantas dessas células de combustível são necessárias para alimentar o dispositivo eletrónico portátil acima descrito?
- Pretende-se que tal dispositivo tivesse uma vida útil operacional de 100 horas. Assumindo 100% de utilização de combustível, qual é a quantidade mínima de combustível H₂ (em gramas) requerida?
- Se esse combustível H₂ for armazenado como gás comprimido a 500 atm, que volume ele ocuparia? (considere gás ideal, temperatura ambiente). Se for armazenado como hidreto metálico a 5% em peso hidrogénio, que volume ele ocuparia? (Suponha que o hidreto metálico tenha uma densidade de 10g/cm³).

Armazenamento de Energia

Flywheels

A flywheel é um dispositivo de armazenamento de energia com capacidade de armazenar uma grande quantidade de energia, para aplicações de curta descarga e com capacidade de carregar e descarregar em altas taxas e por inúmeros ciclos.

Este dispositivo apresenta:

- elevada densidade energética
- elevada potência específica
- elevada eficiência de conversão
- tempos curtos de carga e descarga
- grandes ciclos de vida
- dispositivo ecológico, torna-se um dispositivo útil para várias aplicações

O princípio de funcionamento destes dispositivos é baseado:

- na rotação de uma massa com um elevado momento de inércia, acumulando energia sob a forma de energia cinética na sua rotação, convertendo esta energia cinética em energia elétrica através de um gerador elétrico, quando é necessária uma alimentação durante um curto período de tempo.
- A capacidade energética do sistema depende do momento de inércia desta massa e do quadrado da velocidade de rotação

Armazenamento de Energia

Flywheels

Estes dispositivos são especialmente adequados em sistemas híbridos de armazenamento ou mesmo veículos híbridos.

A flywheel pode efetivamente:

- ajudar os sistemas híbridos no cumprimento dos requisitos de potência de pico para veículos pesados
- auxiliar durante as acelerações e subidas em ciclos tipicamente urbanos, fornecendo aos veículos os elevados níveis de potência de pico necessários, isto por períodos relativamente curtos
- auxiliar durante os períodos de travagem regenerativa, elevados níveis de potência podem ser absorvidos pelo sistema de flywheel com muito maior eficácia que a atingida pelas baterias convencionais

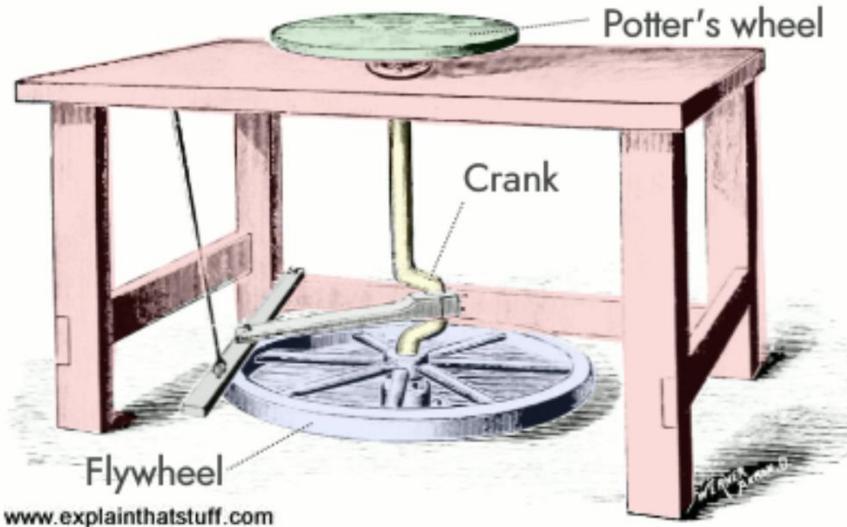
Estes sistemas devem ter um funcionamento completamente interligado com o sistema de armazenamento e regenerador de energia elétrica, podendo armazenar o excesso de energia para posterior utilização.

Armazenamento de Energia

Flywheels

Roda de oleiro (potter's wheel): Estão entre as invenções mais antigas: as primeiras rodas eram feitas de pedra pesada ou madeira maciça e, por terem um alto momento de inércia, funcionavam como flywheel

A roda de oleiro (talvez a forma mais antiga de roda existente - ainda mais antiga que as rodas usadas no transporte) depende da sua plataforma giratória ser sólida e pesada (ou ter um aro pesado), por isso tem um alto momento de inércia que a mantém a girar sozinho enquanto se molda a argila ("barro") por cima com as mãos.



Roda de oleiro: tem uma **flywheel** pesada (azul/lilás, às vezes feita de cimento) montado logo acima do chão, que se gira usando uma manivela acionada pelo pé.

A **flywheel** é ligada por meio de um eixo (amarelo) a uma roda giratória na altura do braço (verde) onde se coloca a argila/barro.

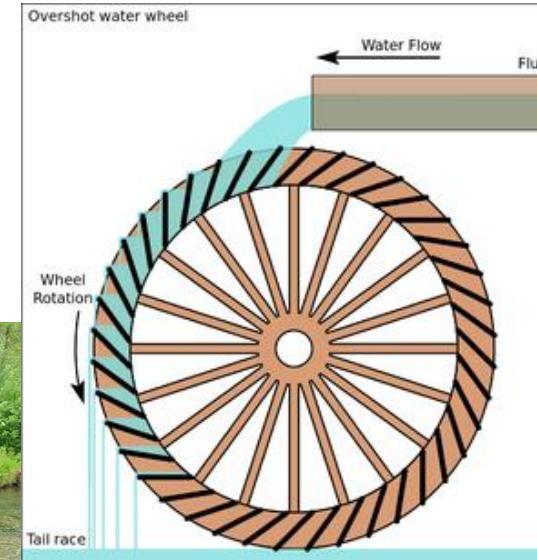


Armazenamento de Energia

Flywheels

As rodas de água: extraem energia dos rios e riachos, também são projetadas como flywheels com raios fortes, mas leves, e aros muito pesados, de modo que continuam girando a uma taxa constante e acionando os moinhos a uma velocidade constante.

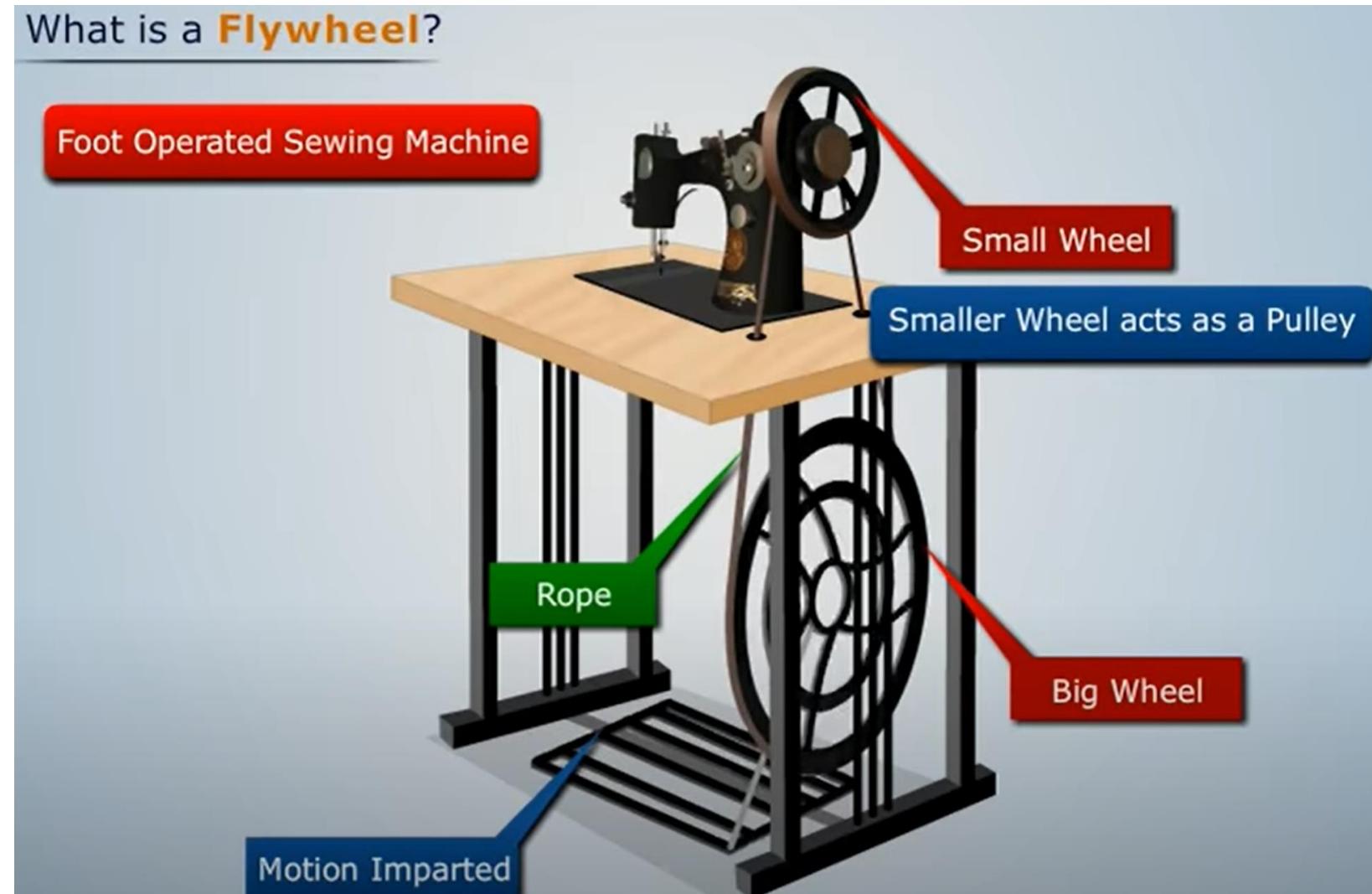
Rodas de água como esta tornaram-se populares a partir da época romana.



Armazenamento de Energia

Flywheels

Máquinas de costura

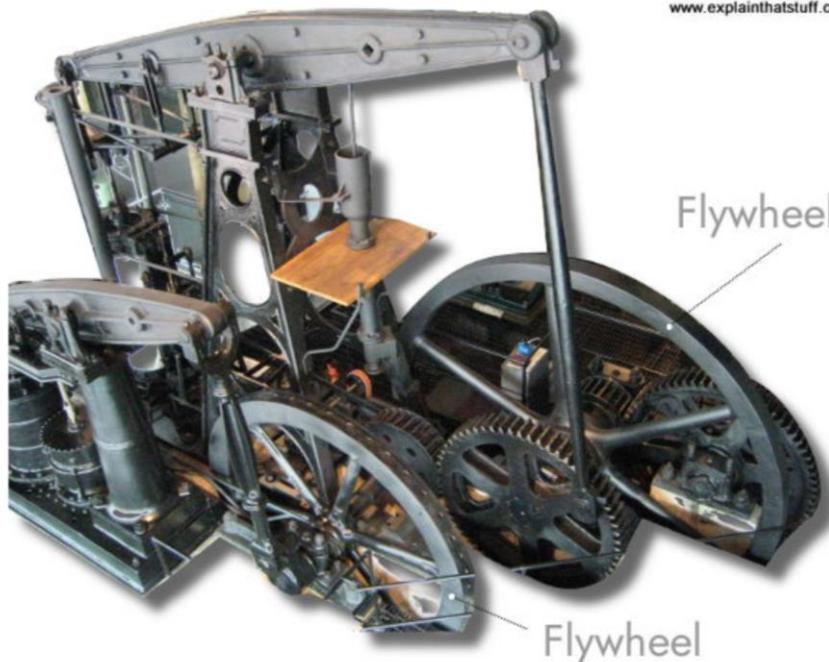


Armazenamento de Energia

Flywheels

As flywheels mais conhecidos datam da Revolução Industrial e são usados em motores a vapor e motores de tração

- ampla disponibilidade de ferro e aço durante a Revolução Industrial tornou possível projetar volantes bem feitos e de alta precisão, que desempenharam um papel vital para garantir que motores e máquinas pudessem operar de maneira eficiente.



2 flywheels em motores antigos no Think Tank, museu de ciência e indústria em Birmingham, UK. Os volantes são na sua maioria espaços vazios com raios longos e um aro grande e pesado.

Flywheels usadas na F1 e carros híbridos



<http://www.chk-net.com/en/product.asp?id=8>

Armazenamento de Energia

Flywheels

O que é?

É na sua essência uma bateria mecânica: uma massa a girar em torno de um eixo baseado na forma de energia cinética

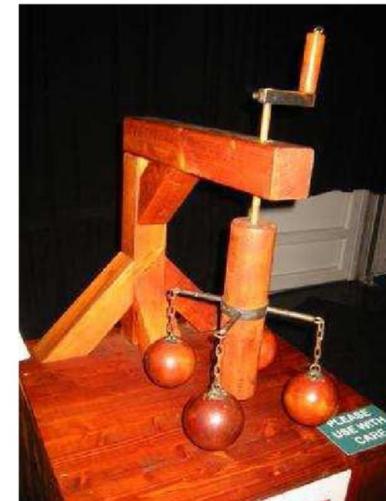
Elas recebem um impulso elétrico para acelerar o rotor usando o motor embutido e retornam a energia elétrica usando esse mesmo motor como gerador.

Um volante de inércia (Flywheel) caracteriza-se por receber energia, armazená-la na forma de energia cinética e devolve-la novamente quando necessário.

Atualmente o uso comercial de energia e sistemas de armazenamento permitem classificar estes sistemas como armazenamento mecânico, elétrico, químico, biológico, térmico ou nuclear.

- A flywheel enquadra-se sem dúvida nos sistemas de armazenamento de energia mecânica.

Por volta de 1497, Leonardo da Vinci, construiu uma máquina que na sua visão quanto mais se roda menos dificuldade oferece à sua rotação, ou seja, à medida que as esferas ganham velocidade e consequentemente energia cinética, mais fácil se torna o movimento rotacional, devido à variação do momento de inércia com o quadrado da velocidade. Fotografia da réplica dessa máquina idealizada por Leonardo Da Vinci.



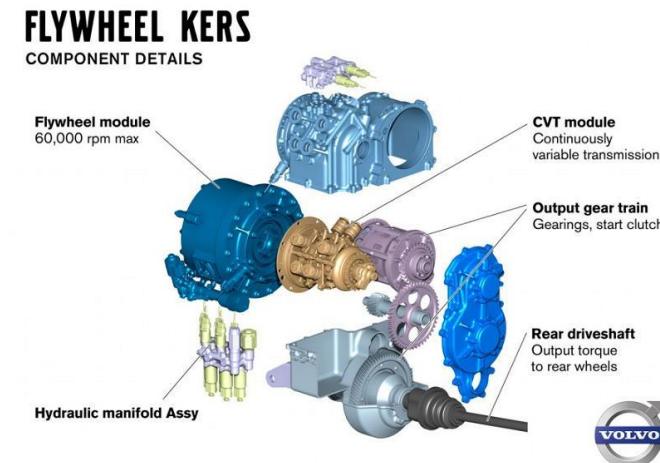
Armazenamento de Energia

Flywheels

O que é?

Fórmula 1 utilizou em 2009 um sistema de recuperação de energia bastante eficiente para as acelerações instantâneas necessárias nestas competições, o sistema KERS da Flybird.

- Este baseia-se na recuperação de energia na travagem, armazenando-a na forma de energia cinética num volante de inércia, que roda a ~40000 rpm.
- Quando solicitado pelo piloto, este fornece uma potência extra de cerca de 80 Cv durante 6.5 segundos, através dos motores elétricos colocados num dos eixos, proporcionando acelerações elevadas com baixas emissões de gases.
- Como os sistemas de flywheel são capazes de absorver e fornecer valores elevados de potência com grande rendimento, torna-se interessante a sua utilização em veículos como alternativa ou em conjunto com as baterias tradicionais.

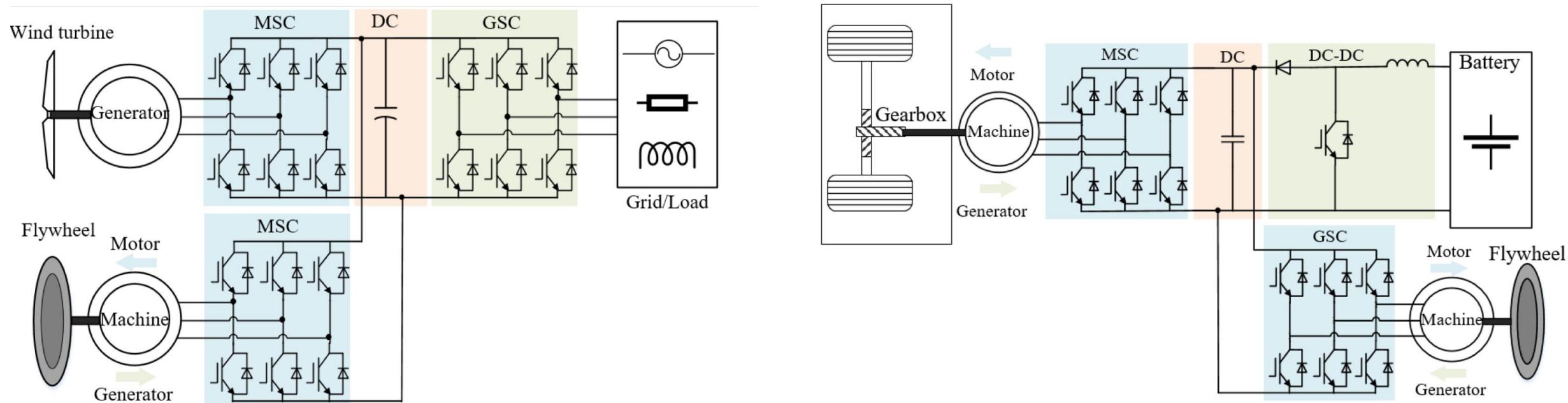


Armazenamento de Energia

Flywheels

Buffer de energia no sistema de geração de energia eólica e sistemas facilitando a travagem regenerativa e o fornecimento de energia

- O sistema pode ser acoplado a um sistema alvo através de um barramento DC comum e é capaz de regular a tensão DC
- Uso híbrido de diferentes tecnologias de armazenamento de energia, como por flywheels e baterias, pode ser mais eficaz e eficiente em alguns cenários.



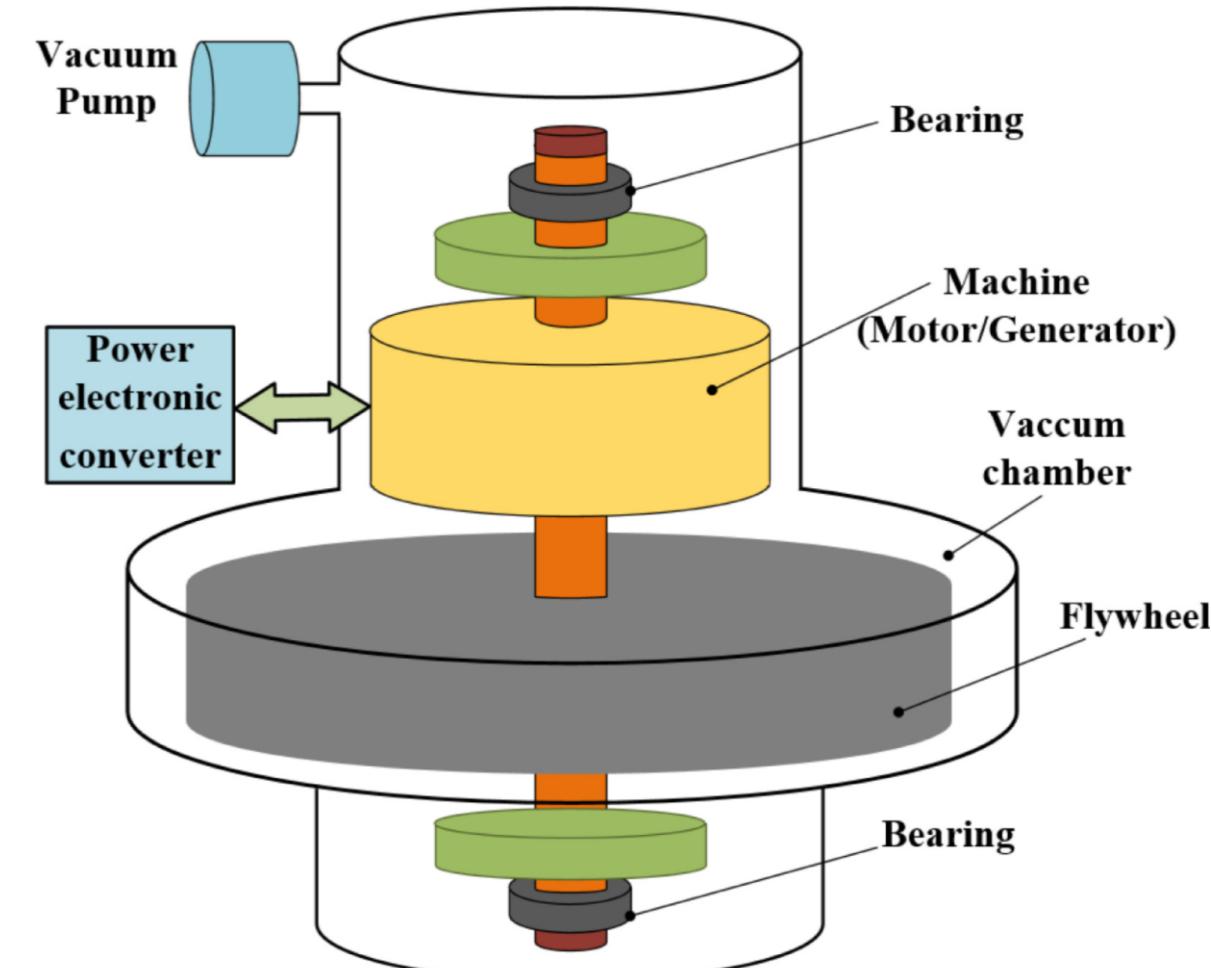
Armazenamento de Energia

Flywheels

O que é?

No modo de carregamento:

- Sistema absorve energia de uma fonte elétrica, como uma rede, e utiliza um conversor de energia bidirecional para controlar a máquina (modo motor) e, assim, acionar a flywheel para que a energia elétrica seja convertida em energia mecânica e armazenada.
- Neste processo, a flywheel ganha velocidade e a energia cinética armazenada aumenta.



Armazenamento de Energia

Flywheels

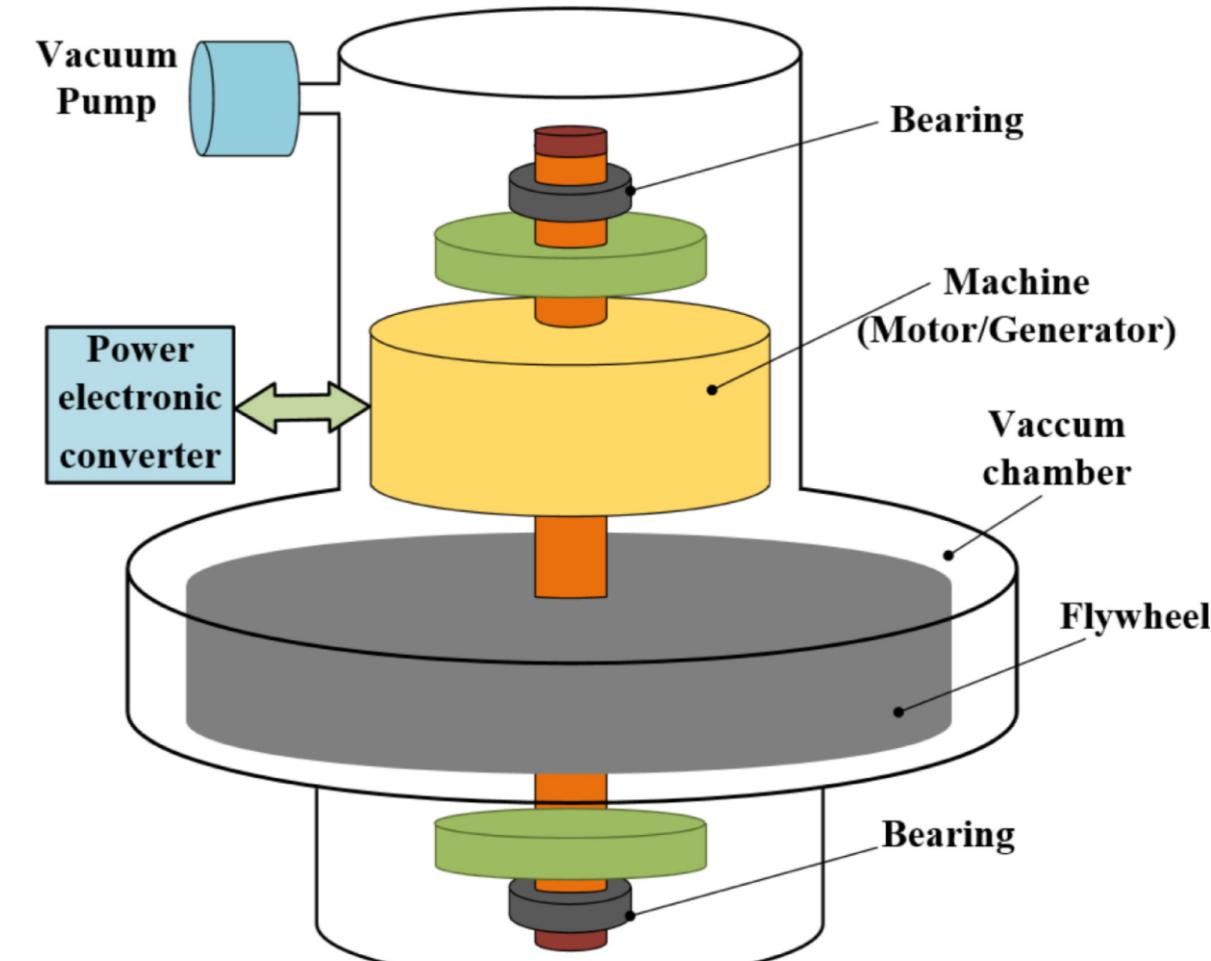
O que é?

No modo de descarga:

- A flywheel funciona como motor principal e a máquina controlada pelo conversor de energia funciona como gerador, de modo que a energia cinética é libertada e convertida em energia elétrica alimentando a rede/outro.
- No processo de descarga, a velocidade de rotação da flywheel é reduzida e a energia cinética diminui.

No modo standby:

- Apenas um pouco de torque ou potência é necessário para manter a velocidade angular da flywheel, pois a velocidade angular é quase constante.

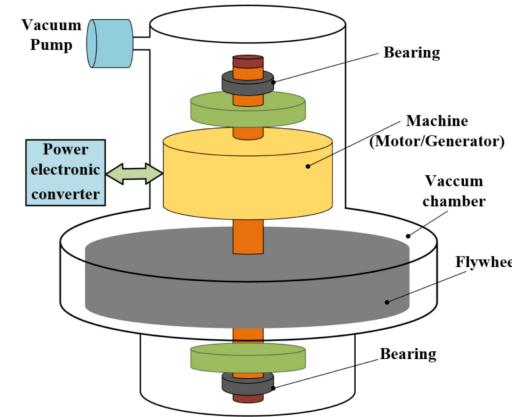


Armazenamento de Energia

Flywheels

Resumindo...

- À medida que o volante inercial (flywheel) gira, sua energia cinética rotacional é transformada em energia cinética linear que ajuda a se mover ainda mais.
- A lei básica que rege esta atividade é a lei da conservação da energia.
- A energia rotacional armazenada pelo volante inercial é transferida para o gerador pelo eixo.
- O gerador converte a energia rotacional em saída elétrica DC.
- Esta saída DC é alimentada no circuito inversor e convertida na forma AC.
- O volante absorve a energia extra quando o momento inercial é maior que o momento de resistência



Armazenamento de Energia

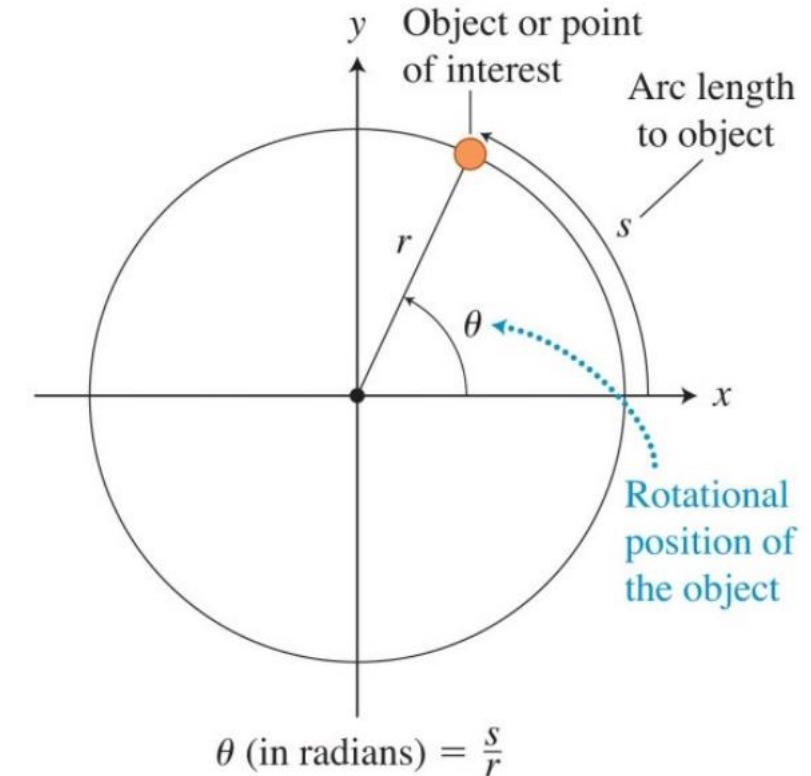
Flywheels

Unidades da posição rotacional

- The unit for rotational position is the radian (rad). It is defined in terms of:
 - The arc length s
 - The radius r of the circle
- The angle in units of radians is the ratio of s and r :

$$\theta = \frac{s}{r} \quad (\text{measured in radians})$$

- The radian unit has no dimensions; it is the ratio of two lengths. The unit **rad** is just a reminder that we are using radians for angles.



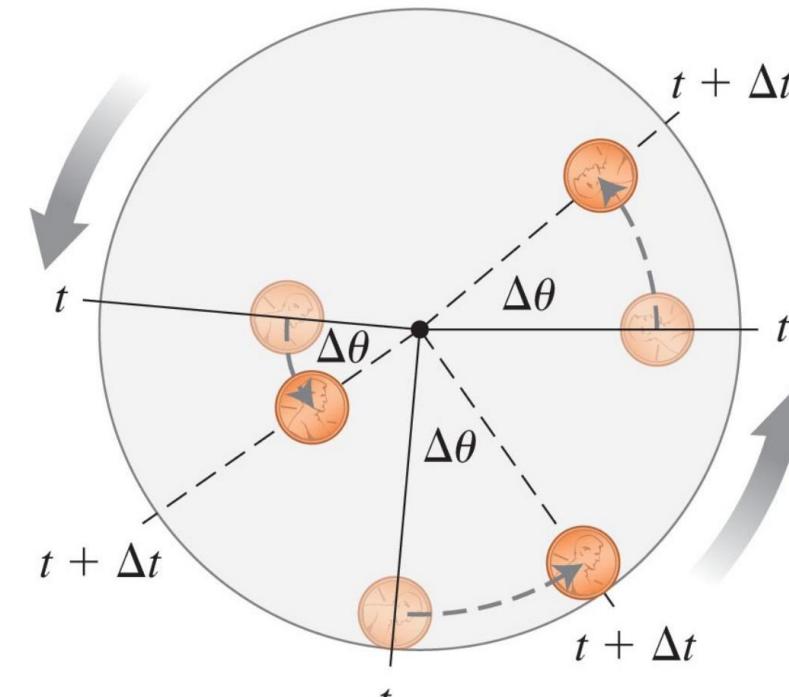
Armazenamento de Energia

Flywheels

Velocidade rotacional / angular

- Translational velocity is the rate of change of linear position.
- We define the rotational (angular) velocity ν of a rigid body as the rate of change of each point's rotational position.
 - All points on the rigid body rotate through the same angle in the same time, so **each point has the same rotational velocity**.

All coins turn through the same angle in Δt , regardless of their position on the disk.



$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

Armazenamento de Energia

Flywheels

Aceleração rotacional / angular

A aceleração descreve a mudança na velocidade de um objeto para movimento linear.

- Poderíamos aplicar a mesma ideia ao centro de massa de um corpo rígido que se move como um todo de uma posição para outra.
 - A taxa de variação da velocidade rotacional do corpo rígido é a sua aceleração rotacional.
- Quando a taxa de rotação de um corpo rígido aumenta ou diminui, ele tem uma aceleração rotacional diferente de zero.

Rotational acceleration α The average rotational acceleration α (alpha) of a rotating rigid body (sometimes called angular acceleration) is its change in rotational velocity $\Delta\omega$ during a time interval Δt divided by that time interval:

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

The unit of rotational acceleration is $(\text{rad}/\text{s})/\text{s} = \text{rad}/\text{s}^2$.

Armazenamento de Energia

Flywheels

Movimento rotacional a aceleração angular constante

- θ_0 is an object's rotational position at $t_0 = 0$.
- ω_0 is an object's rotational velocity at $t_0 = 0$.
- θ and ω are the rotational position and the rotational velocity at some later time t .
- α is the object's constant rotational acceleration during the time interval from time 0 to time t .

Translational motion

$$v_x = v_{0x} + a_x t$$

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{1}{2}a_x t^2$$

$$2a_x(x - x_0) = v_x^2 - v_{0x}^2$$

Rotational motion

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad (8.6)$$

$$\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2 \quad (8.7)$$

$$2\alpha(\theta - \theta_0) = \omega^2 - \omega_0^2 \quad (8.8)$$

Armazenamento de Energia

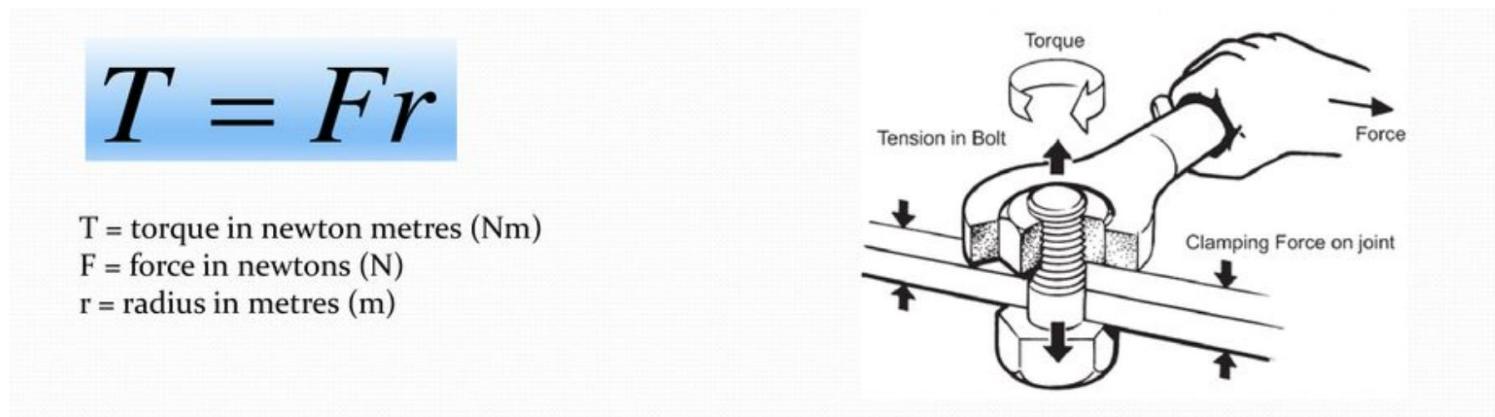
Flywheels

Torque

Uma força que produz um efeito de rotação num objeto é chamada de torque.

O efeito de rotação depende de:

- Tamanho da força (F) que atua perpendicularmente à rotação
- Distância do eixo de rotação à força (r)



Armazenamento de Energia

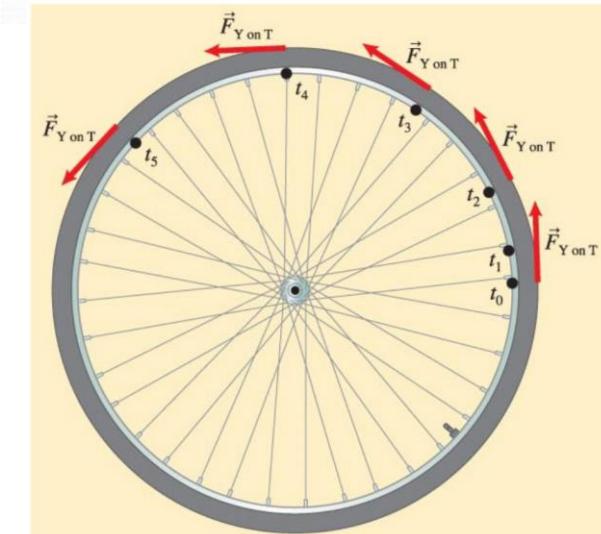
Flywheels

Torque

- Um torque produzirá uma aceleração angular em torno de um eixo de rotação.
- O equivalente rotacional da massa é chamado de momento de inércia (I) de um objeto.
- Depende:
 - da massa do próprio objeto
 - distribuição da massa no seu eixo de rotação
- O momento de inércia às vezes é chamado de massa rotacional e é muito importante no movimento rotacional.

$$T = I\alpha$$

T = torque measured in newton metres (Nm)
 I = moment of inertia measured in kgm^2
 α = angular acceleration (rad s^{-2})



Armazenamento de Energia

Flywheels

Momento de inércia

- O momento de inércia de um objeto (I) é a medida da sua relutância em mudar o seu movimento rotacional.
- Depende:
 - massa do objeto
 - distribuição de sua massa em torno de seu eixo de rotação.
- A expressão para o momento de inércia de uma massa pontual (m) a uma distância (r) do eixo de rotação pode ser derivada pensando na 2^a Lei de Newton:

Newton's 2nd Law

$$F = ma$$

Multiply both sides by r

$$Fr = mra$$

Torque $T = Fr$
angular acceleration $\alpha = a/r$
 $a = \alpha r$

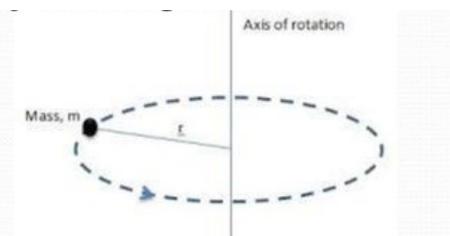
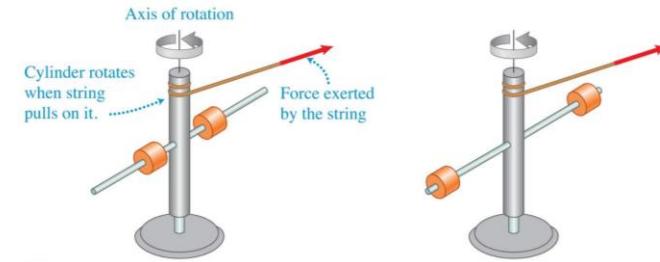
$$T = m \times r \times \alpha r$$

$$T = (mr^2)\alpha$$

Radius² (m²)

Moment of inertia (kgm²)

Mass (kg)



$$I = mr^2$$

Armazenamento de Energia

Flywheels

Modelo Matemático da Flywheel

O princípio de armazenamento de energia baseado numa flywheel não é novo.

Sendo este baseado no mesmo princípio da mó dos moinhos, ou seja, uma massa em rotação. A energia cinética armazenada (E_{ca}) obtém-se segundo a equação abaixo. Nestes sistemas com flywheel a energia cinética depende do momento de inércia I e da velocidade de rotação ω da flywheel.

$$E_{ca} = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad I = \int r^2 dM$$

I é o momento de enérgia
 ω a velocidade angular

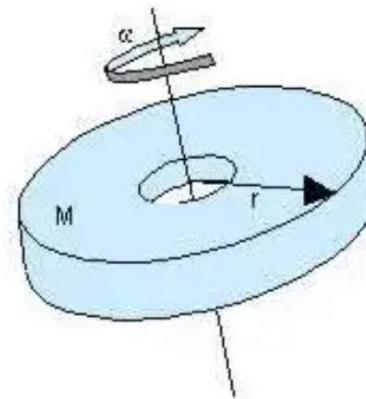
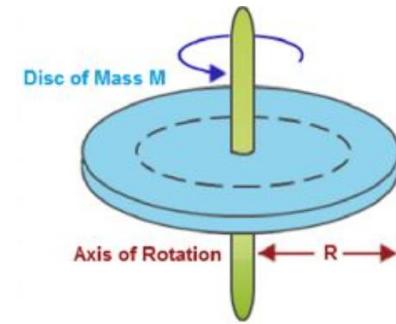
Para cilindros sólidos, o momento de inércia I é dado por:

$$M = V\rho \quad \longrightarrow \quad I = \frac{1}{2} r^4 \pi L \rho$$

A energia aumenta se ω aumenta ou se I aumenta

I pode ser aumentado localizando o máximo de massa possível na parte externa do disco.

- Mas à medida que a velocidade aumenta e mais massa é localizada fora do disco, as limitações mecânicas são mais importantes.



Utiliza a conservação do momento angular para armazenar energia rotacional

Uma forma de E_c proporcional ao produto do seu momento de inércia e ao quadrado da sua velocidade de rotação

Armazenamento de Energia

Flywheels

Modelo Matemático da Flywheel

Uma das formas mais usuais em flywheels é o cilindro oco. O momento de inércia I para um cilindro oco tem que contemplar a diferença entre o raio externo (r_0) e o interno (r_i), sendo o momento de inércia I é calculado pela equação:

$$I = \frac{1}{2}\pi L\rho(r_0^4 - r_i^4) \quad \rightarrow \quad E_{ca} = \frac{1}{4}\pi L\rho(r_0^4 - r_i^4)\omega^2$$

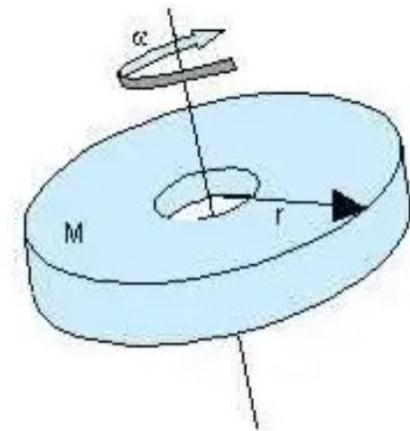
r₀ é o raio externo
r_i é o raio interno.

A energia entregue pela flywheel (ΔE_{ca}) pode ser determinada tendo em conta a variação da velocidade do disco segundo a equação:

$$E_{ca} - E_{ca\ minima} = \Delta E_{ca} = \frac{1}{2}I(\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2)$$

A flywheel pode ser utilizada como dispositivo de potência, sendo a potência (P) a taxa à qual a energia é convertida num período de tempo (Δt), dada por:

$$P = \frac{\Delta E_{ca}}{\Delta t} = \frac{1}{2}I \frac{(\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2)}{\Delta t}$$



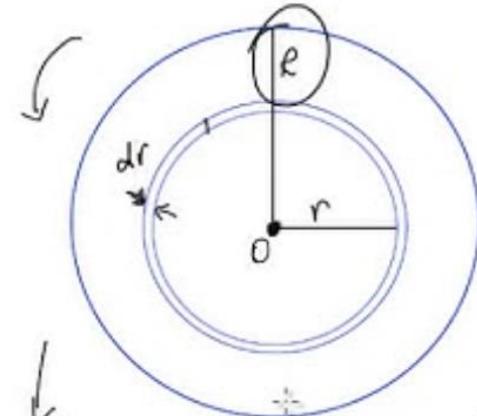
Armazenamento de Energia

Flywheels

Cilindro sólido

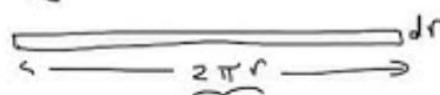
Disco

$$\text{ANEL: } I = m R^2$$



$$\sigma = \frac{m}{A} = \frac{dm}{dA} \rightarrow dm = \sigma \cdot dA$$

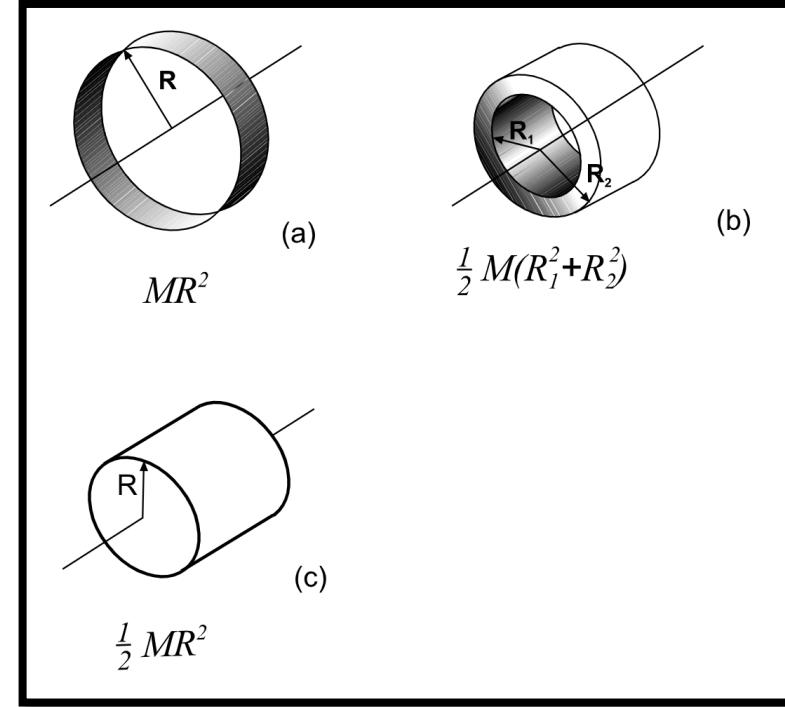
$$dm = \sigma \cdot dr \cdot 2\pi r$$



$$dm = \frac{m}{\pi R^2} \cdot dr \cdot 2\pi r$$

$$\begin{aligned} dI &= dm \cdot r^2 \\ I &= \int dI = \int_0^R r^2 dm \\ I &= \int_0^R \frac{m}{R^2} \cdot dr \cdot 2\pi r \cdot r^2 \\ I &= \frac{2m}{R^2} \int_0^R r^3 dr \end{aligned}$$

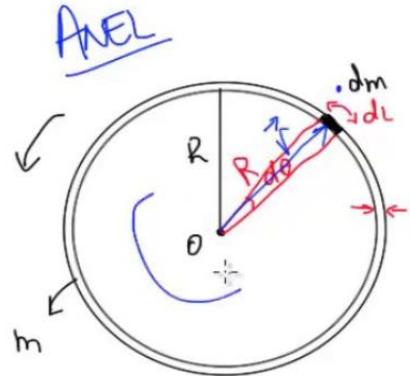
$$\begin{aligned} I &= \frac{2m}{R^2} \cdot \left(\frac{R^4}{4} \right) \\ I &= \frac{1}{2} m R^2 \end{aligned}$$



Armazenamento de Energia

Flywheels

Anel



$$L = 2\pi R$$

$$dL = R \cdot d\theta$$

$$\lambda = \left(\frac{m}{L} \right) = \frac{dm}{dL} \rightarrow dm = \lambda \cdot dL$$

$$dm = \frac{m}{2\pi R} \cdot R \cdot d\theta$$

$$dm = \frac{m}{2\pi} d\theta$$

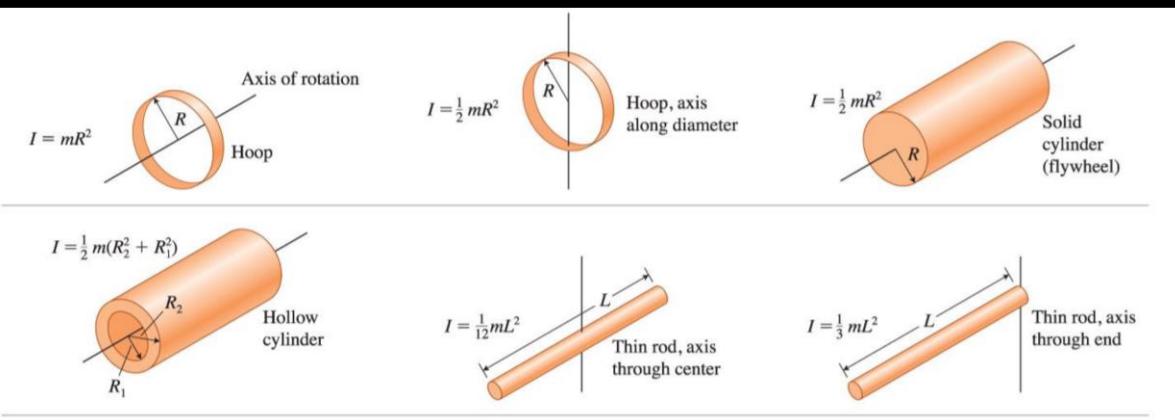
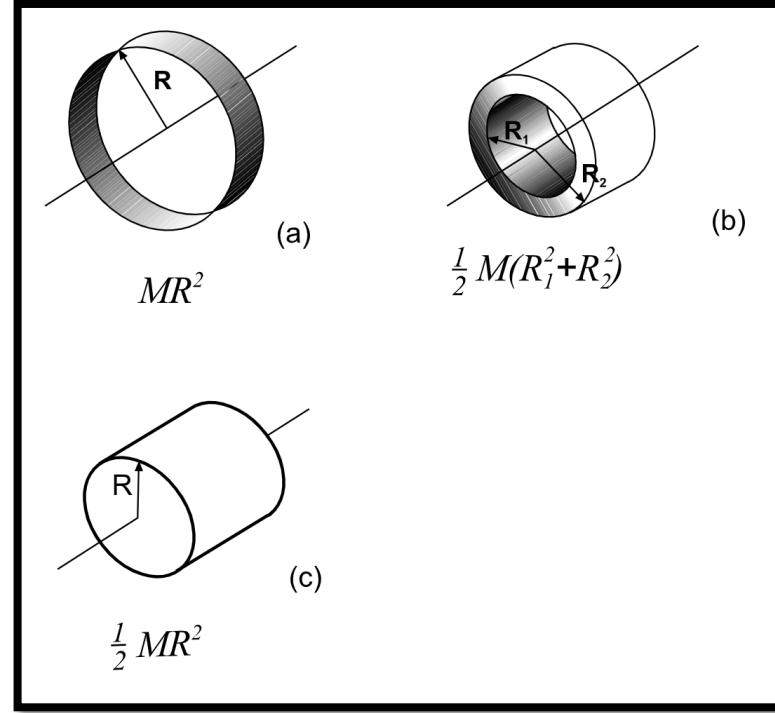
$$I = \int r^2 dm$$

$$I = \int R^2 \frac{m}{2\pi} d\theta$$

$$I = R^2 \frac{m}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\theta$$

$$I = R \frac{m}{2\pi} \cdot 2\pi$$

$$I = m R^2$$

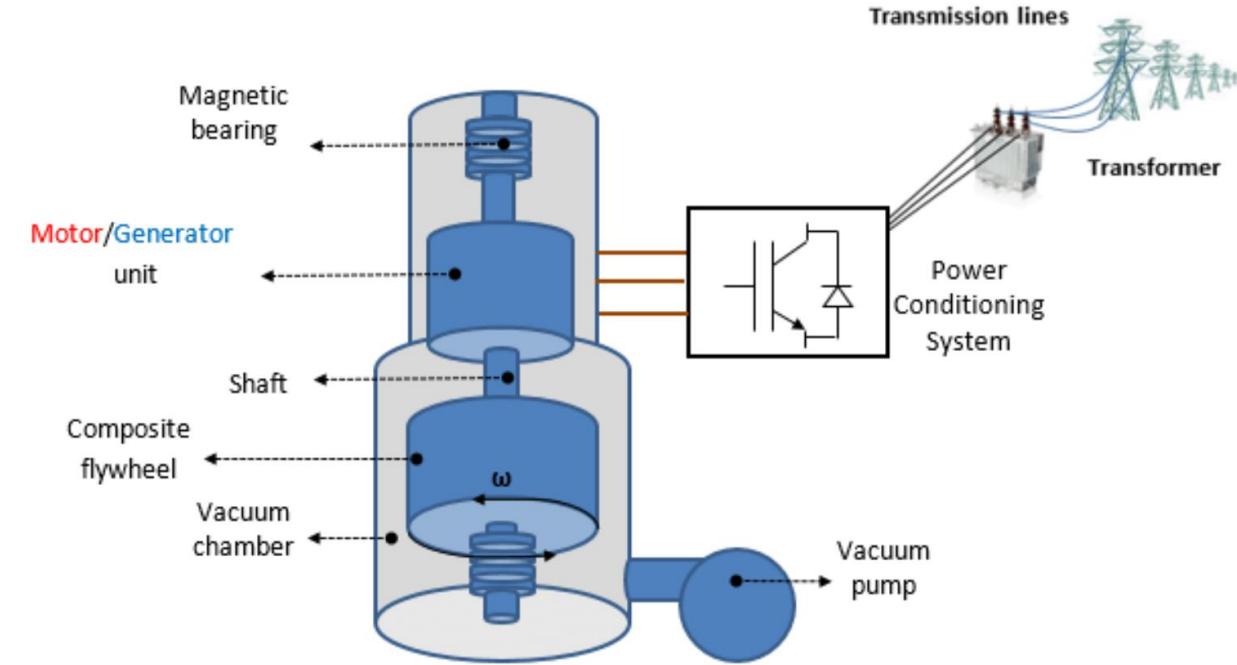
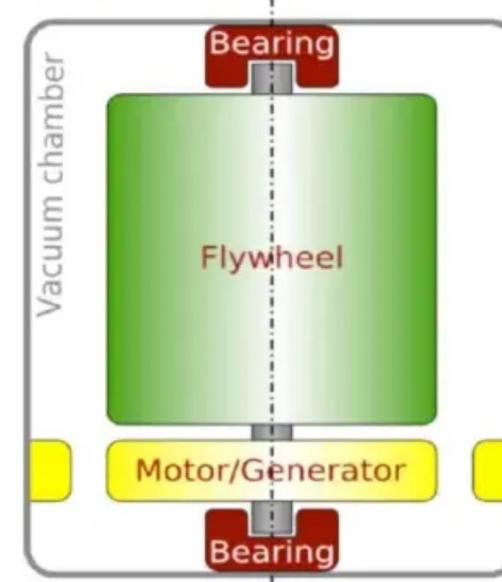


Armazenamento de Energia

Flywheels

Componentes do sistema de armazenamento

- Flywheel
- Motor/generator
- Eletrónica de potência
- Rolamentos magnéticos
- Indutor externo



Estator: O estator é a parte fixa do motor, é um anel de metal com enrolamentos de fios de cobre isolados (bobinas) num núcleo de aço.

Rotor: Consiste numa haste, com barras condutoras uniformemente espaçadas no seu núcleo. Durante o trabalho, o rotor interage com o campo magnético gerando velocidade e torque

Armazenamento de Energia

Flywheels

Componentes do sistema de armazenamento: flywheel

As flywheels armazena姆 energia numa massa rotativa de aço de material compósito

A inércia mecânica é a base deste método de armazenamento

Uso de um motor/gerador, a energia pode ser ciclica (absorvida e depois descarregada)

Aumentando a velocidade superficial da flywheel, a capacidade de armazenamento de energia (kWh) da unidade aumenta

A energia depende da massa e geometria do rotor, mas em maior medida da velocidade da flywheel.

Armazenamento de Energia

Flywheels

Componentes do sistema de armazenamento: Motor/gerador

As máquinas de íman permanente têm mais vantagens, incluindo:

- alta eficiência
- tamanho menor quando comparadas com outros tipos de motores/geradores da mesma potência

O íman permanente também apresenta perdas mais baixas no rotor e indutâncias de enrolamento mais baixas, o que o torna mais adequado para um ambiente operacional de vácuo e para a rápida transferência de energia de aplicações de flywheels.

O motor/gerador é projetado para ser operado em alta velocidade para minimizar o tamanho do sistema.

Armazenamento de Energia

Flywheels

Componentes do sistema de armazenamento: Eletrónica de potência e instrumentação

A maioria dos sistemas de energia da flywheel possui alguma forma de eletrónica de potência que converte e regula a potência da flywheel (inversores e reguladores/retificadores).

- À medida que o motor/gerador ou alternador utiliza energia mecânica no rotor, o rotor desacelera, alterando a frequência da saída elétrica AC.

A principal função destes dispositivos:

- permitir que a energia seja retirada da roda antes que sua frequência e potência caiam abaixo dos níveis utilizáveis.
- a velocidade de corte inferior (isto é, no final da descarga) na qual a flywheel é considerada descarregada depende principalmente:
 - da capacidade de transporte de corrente por parte da eletrónica (ou acoplamento eletromecânico)
 - Do tamanho da carga

Instrumentação é usada para monitorizar variáveis críticas: velocidade do rotor, temperatura, alinhamento, etc

Armazenamento de Energia

Flywheels

Componentes do sistema de armazenamento: Rolamentos magnéticos

Os rolamentos magnéticos consistem em ímans permanentes, que suportam o peso da flywheel repelindo a força e os eletromagnetsos são usados para estabilizar a flywheel.

O rolamento com melhor desempenho é o rolamento magnético supercondutor de alta temperatura, que pode posicionar o volante de inércia automaticamente sem necessidade de eletricidade ou sistema de controlo de posicionamento.

Ímans supercondutores de alta temperatura requerem tratamento criogénico por nitrogénio líquido (azoto líquido).

Armazenamento de Energia

Flywheels

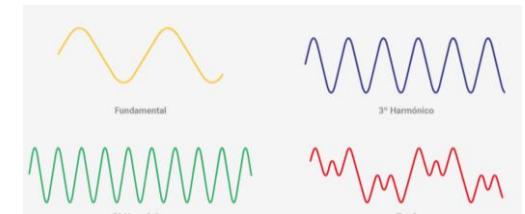
Componentes do sistema de armazenamento: indutor externo

As máquinas magnéticas permanentes de alta velocidade oferecem baixas indutâncias com baixo número de voltas do estator e grandes entreferros magnéticos operacionais

As baixas indutâncias resultam em alta distorção harmónica total*, o que aumenta as perdas de potência e temperatura da máquina.

O uso de um indutor externo em série com a máquina em modo de carga é necessário para reduzir a distorção harmónica total e trazê-la para dentro de uma faixa aceitável

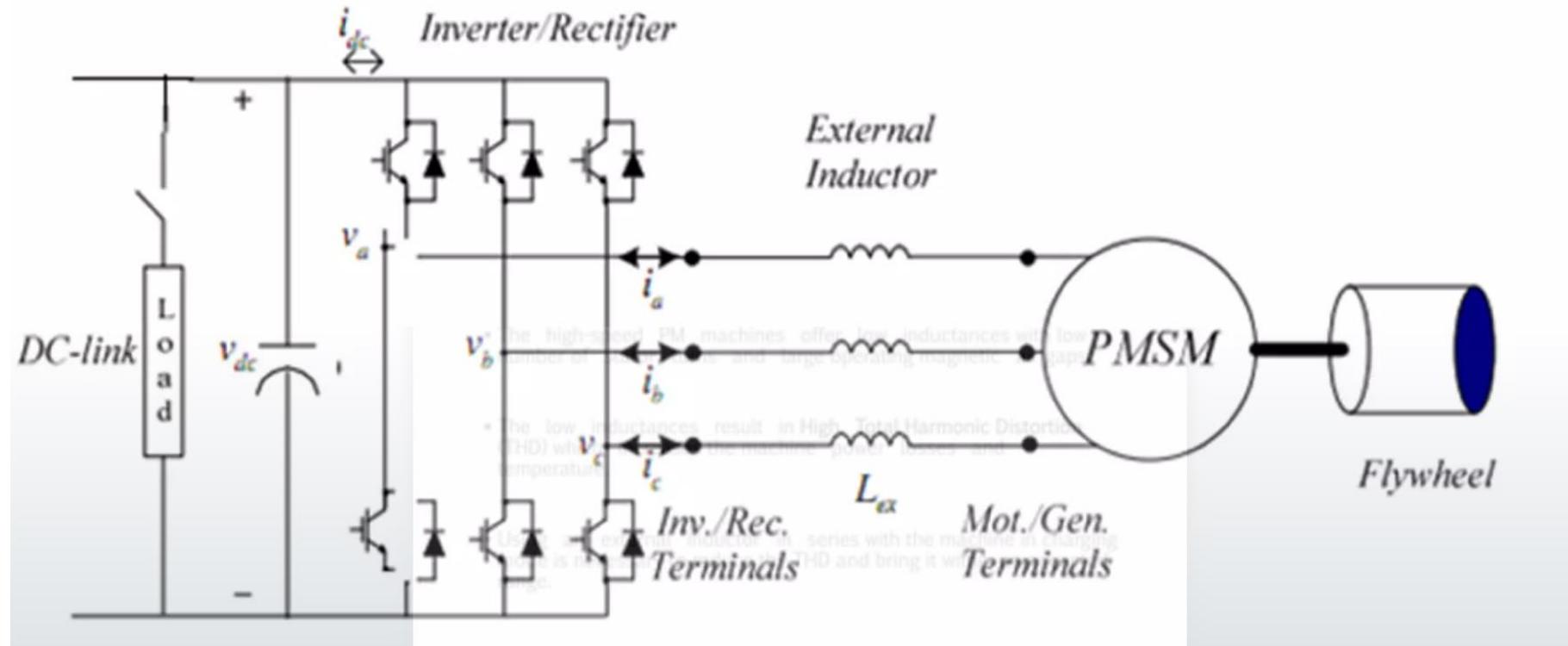
*Energia elétrica que está presente no nosso dia a dia é de corrente alternada e tem a frequência de 50 Hz, a que chamamos de fundamental. Os harmónicos são correntes com frequências distintas da fundamental que transitam no sistema causando grandes danos a equipamentos e condutores.



Armazenamento de Energia

Flywheels

Componentes do sistema de armazenamento



Armazenamento de Energia

Flywheels

Vantagens

- elevada densidade energética
- elevada potência específica
- elevada eficiência de conversão
- tempos curtos de carga e descarga
 - Muito útil para ultra-fast charging
- grandes ciclos de vida – independente da duração da carga e descarga
- dispositivo ecológico
- Sistemas não sensíveis a temperatura dado que são operados num condicionamento de vácuo.

Sistemas avançados de flywheel giram acima de 20.000 rpm em sistema vácuo feito de filamento composto de carbono de alta resistência e é muito eficiente

Não são a principal fonte de geração de energia

Quando há muita energia na rede, ela é desviada para as flywheels e usada para colocar em movimento

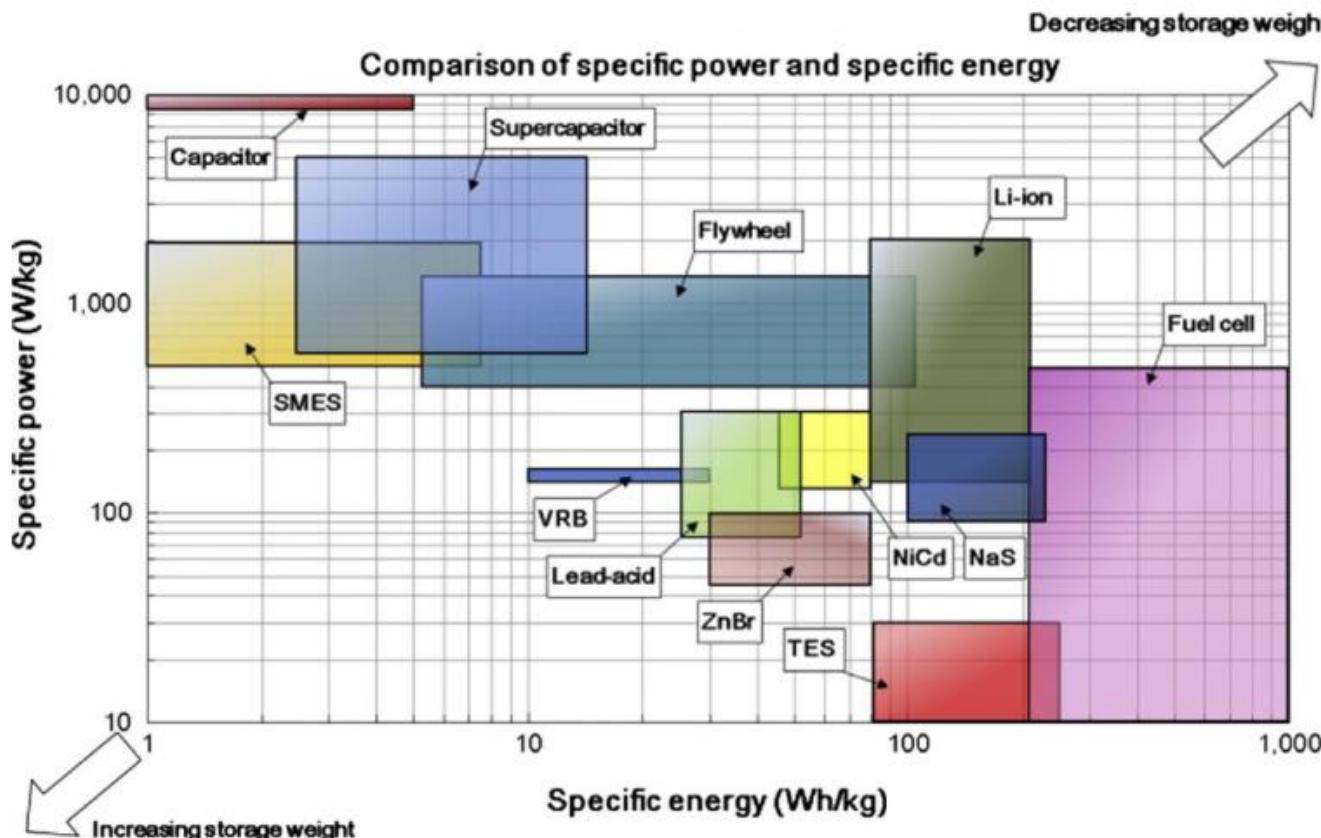
- Então, quando a energia for necessária, alguns segundos ou minutos depois, o impulso das flywheels é usado para gerar energia de volta à rede.

	Battery	Flywheel
Mechanism of storing energy	Chemical reactions	Kinetic energy
Charge/discharge cycles before end of life	A few thousand	Practically unlimited
Toxic and flammable	Yes	No
Manufacturing and disposal	Environmentally-harmful	Environmentally friendly
Physical size per unit of energy	Smaller	Larger
C-Rate (ratio between Power and Capacity)	<1 (slow charge/recharge)	>4 (fast charge / recharge)

Num sistema flywheel o valor da eficiência situa-se entre 80 e 90%.

Armazenamento de Energia

Flywheels



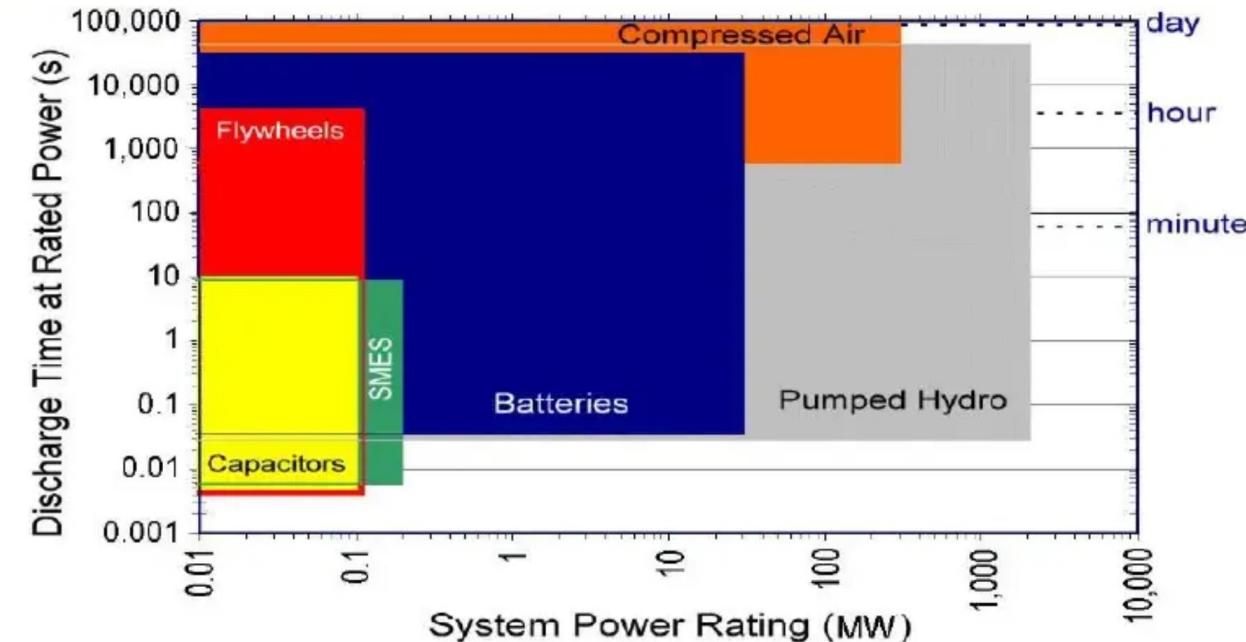
Storage Device	Energy Density		Power Density	Cycle Life (75% discharge)
	J/g	W/kg		
Compression of Gases	12	10^4	10^7	
Hydraulic Accumulator	28	10^4	10^7	
Steel Spring	0.32	10^4	10^7	
Lead Acid Battery	64	80	500	
Ni Ca Battery	110	80	3000	
Flywheel	200	10^4	10^7	

Armazenamento de Energia

Flywheels

Desvantagens

- Complexidade de rolamentos duráveis e de baixa perda
- Tensão mecânica e limites de fadiga
- Limites de material para velocidades de ponta
- Modos de falha potencialmente perigosos
- Perdas parasitárias e intrínsecas relativamente altas
- Tempo de descarga curto
- Combinações entre massa e velocidade podem ser feitas para otimização do projeto,
 - utilização de materiais compósitos no rotor e seu acionamento em ambiente de vácuo para redução das perdas pelo atrito viscoso do ar (sistema de vácuo aumenta custo)



Armazenamento de Energia

Flywheels

Exemplos:

Sistemas de lançamento de caças

- O porta-aviões da classe Gerald R. Ford usa flywheels para acumular energia da fonte de alimentação do navio, para libertação rápida no sistema eletromagnético de lançamento de caças.
- O sistema de energia a bordo não pode, por si só, fornecer os transientes de alta potência necessários para lançar os caças.
- Cada um dos quatro rotores armazenará 121 MJ (34 kWh) a 6.400 rpm. Eles podem armazenar 121 MJ (34 kWh) em 45 segundos e libertá-los em 2–3 segundos.
- As densidades de energia da flywheel são 28 kJ/kg (8 W·h/kg)



Armazenamento de Energia

Flywheels

Exemplos:

Flywheel G2 da NASA para armazenamento de energia de spacecrafts

- Este foi um projeto financiado pelo Glenn Research Center da NASA e destinado a testes de componentes em ambiente de laboratório.
- Ele usava um aro de fibra de carbono com cubo de titânio projetado para girar a 60.000 rpm, montado em rolamentos magnéticos.
- O armazenamento era de 525 Wh (1,89 MJ) e podia ser carregado ou descarregado a 1 kW, levando a uma energia específica de 5,31 W·h/kg e densidade de potência de 10,11 W/kg.
- O modelo funcional mostrado funcionava a 41.000 rpm em 2 de setembro de 2004.



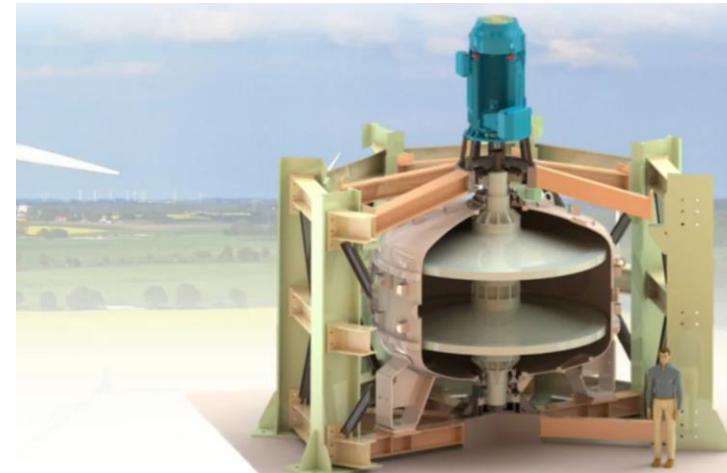
Armazenamento de Energia

Flywheels

Exemplos:

Vários sistemas de armazenamento têm sido desenvolvidos tendo como base a flywheel:

- um sistema alemão instalado em Dresden que pode absorver ou fornecer 5 MW durante 5s.
- Em Austin, Texas, uma flywheel garante 4,75 MW para condicionamentos de energia e proteção contra falhas de energia.
- No Japão, um armazenamento de 200 MJ tem sido utilizado para eliminar as flutuações na potência ativa fornecida
- China com um sistema flywheel com 1000kW/35 kWh de armazenamento.



Armazenamento de Energia

Flywheels

Exemplos: EATON



Produtos Digital Serviços Mercados Suporte Er

ENERGIA DE RESERVA (UPS)

Soluções de volante

Certificados para uso com os UPS trifásicos da Eaton 9390, 9395 e 93PM, os sistemas de volante VYCON oferecem uma fonte de alimentação CC altamente confiável. Os sistemas de backup de UPS Direct Connect VDC, VDC-XE e VDC140 oferecem uma alternativa às baterias de chumbo-ácido e proporcionam capacidade de energia sem precedentes para energia de backup instantânea e confiável.

[Contate-me sobre este produto](#)

[Como comprar ▾](#)



Produtos Digital Serviços Mercados Suporte Empresa

VISÃO GERAL **ESPECIFICAÇÕES** RECURSOS

Especificações técnicas

Modelo VYCON	VCC	VCC-XE	VCC140
Potência nominal	215 kW	300 kW	140 kW
Armazenamento máximo de energia	3.000 kW-s a 100 kW	3.000 kW-s a 160 kW	2.244 kW-s
Velocidade rotacional do volante	18,5 a 36 kRPM	18,5 a 36 kRPM	24 a 36 kRPM
Tensão de entrada	400 a 600 VCC	400 a 600 VCC	420 a 600 VCC
Descarga de tensão de saída (ajustável de acordo com a aplicação)	400 a 520 VCC	400 a 520 VCC	400 a 500 VCC
Dimensões (A x L x P)	1.872 mm (73,7 pol) x 762 mm (30,0 pol) x 762 mm (30,0 pol)	1.872 mm (73,7 pol) x 762 mm (30,0 pol) x 762 mm (30,0 pol)	1.981 mm (78,0 pol) x 1.219 mm (48,0 pol) x 610 mm (24,0 pol)
Peso	826 kg (1.822 lb)	826 kg (1.822 lb)	872 kg (1.922 lb)

Armazenamento de Energia

Flywheels

Exemplos: empresa QuinteQ, Países Baixos (<https://quinteqenergy.com/>)

Flywheel conta com um rotor de carbono leve e ultrarrápido que é 100% levitado magneticamente – 22500 rpm

Design usa cristais supercondutores para tornar a flywheel completamente sem atrito.

É seguro, compacto e pode ser colocado num container normal.

Um único módulo de flywheel é capaz de fornecer 100kW e 5kWh.

Nos próximos anos, aumentarão isso para especificações mais altas de potência e energia por módulo de flywheels.

- **100kW - 5kWh modules**
- **Standby losses <0.1% per hour**
- **>98% round trip efficiency (DC)**
- **Extremely fast response time (<3 ms)**
- **2500kg total weight**
- **30-year design life**



O sistema QuinteQ é o cortador de pico perfeito para picos de potência frequentes que duram de segundos a minutos. Pode fornecer energia em locais onde a infraestrutura é insuficiente para o fazer.

Armazenamento de Energia

Flywheels

Exemplos:

Flywheel c.
levitado m.

Design usc.
sem atrito

É seguro, c.

Um único

Nos próxi
potênci

- 100kW

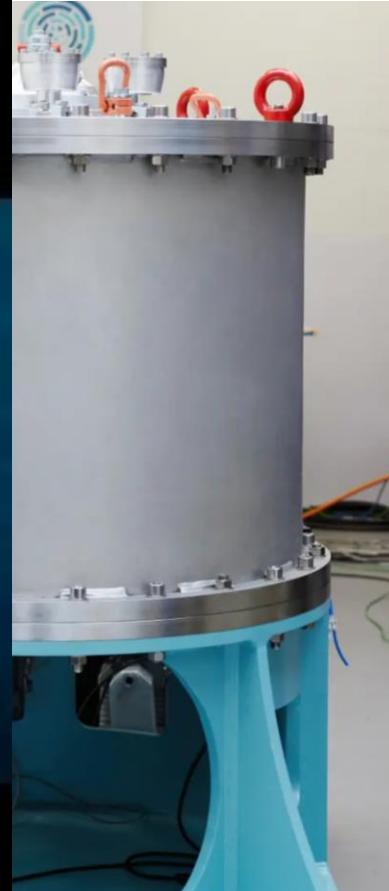
- Standby

- >98% r

- Extrem

- 2500kg total weight

- 30-year design life



para picos de potência frequentes que duram de segundos a minutos. Pode fornecer energia em locais onde a infraestrutura é insuficiente para o fazer.

Armazenamento de Energia

Flywheels

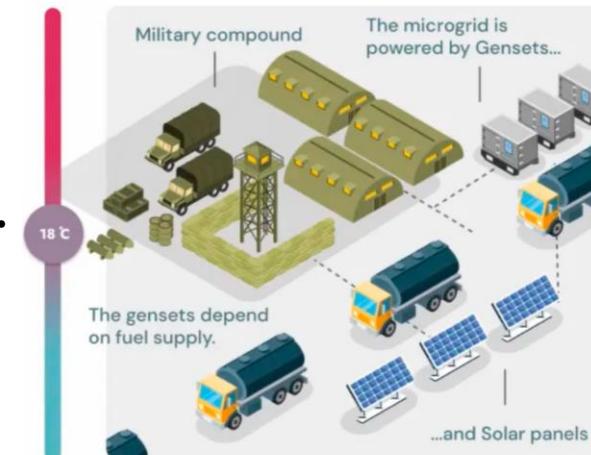
Exemplos: empresa QuinteQ, Países Baixos (<https://quinteqenergy.com/>)

QuinteQ Energy reconfirms partnership with Boeing to revolutionize the energy transition

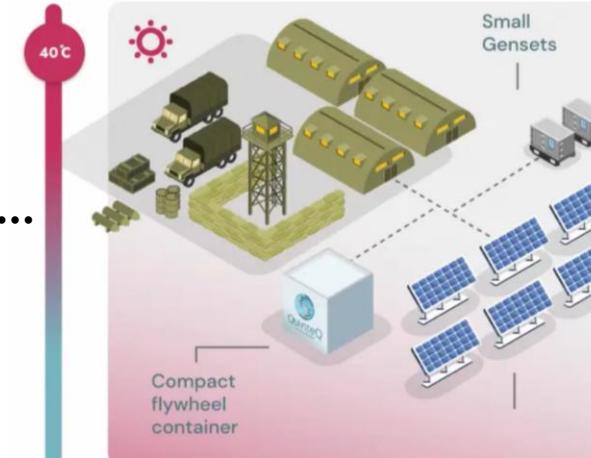
November 13, 2023 was a good day for multiple reasons. We had the honor to present our success story of our 5-year long collaboration with Boeing to the Minister of Economic Affairs and Climate, Micky Adriaansens at Huis ter Duin. Flanked by leadership from the Boeing Company, the Ministry of Economic Affairs & Climate and from the Ministry of Defence, we were able to introduce to the Minister the unique attributes of the world's most advanced flywheel energy storage technology and how this serves both our goal towards a more sustainable society as well as for more resilient microgrids for our national security.



Até agora...



Em progresso...



High fuel consumption

Minimal CO2 reduction

High costs

Unstable energy



Low fuel consumption

Maximal CO2 reduction

Lower costs

Stable energy

Armazenamento de Energia

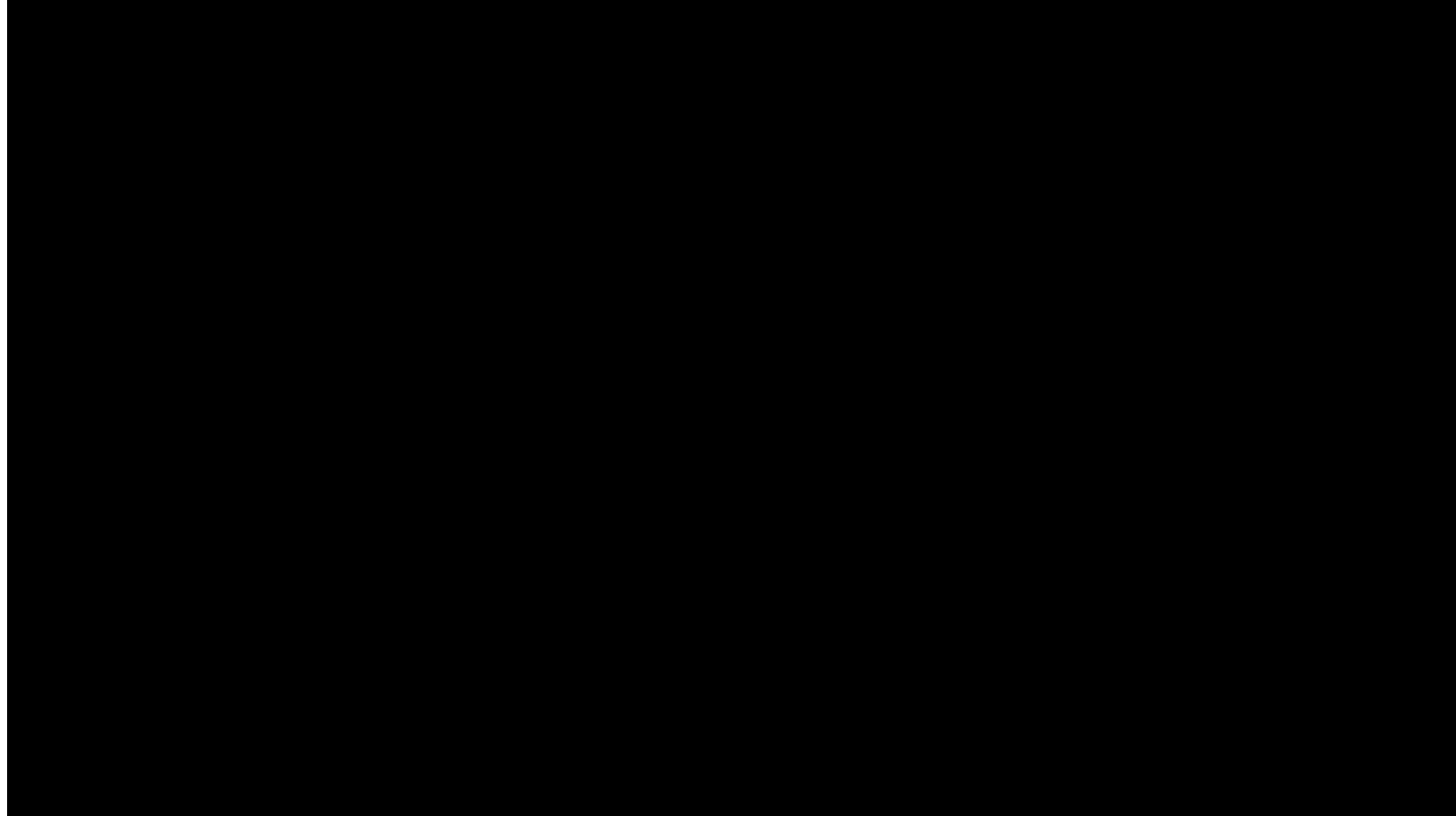
Outras aplicações usando princípio físico da flywheel



<https://www.youtube.com/watch?v=KDia-69EIA0>

Armazenamento de Energia

Outras aplicações usando principio fisico da flywheel



Armazenamento de Energia

Próxima aula:

Resolução de exercícios e parte 2 do capítulo 6.

Armazenamento de Energia

Flywheels

Haste e centro de massa a meio (tipo helicóptero):

$$i) \quad I = \int x^2 dm$$

$$ii) \quad \lambda = \frac{dm}{dx}$$

$$iii) \quad \lambda dx = dm$$

$$iv) \quad I = \int x^2 dm = \int_{-\frac{1}{2}L}^{\frac{1}{2}L} x^2 \lambda dx$$

$$v) \quad I = \lambda \int_{-\frac{1}{2}L}^{\frac{1}{2}L} x^2 dx = \lambda \left[\frac{1}{3}x^3 \right]_{-\frac{1}{2}L}^{\frac{1}{2}L} =$$

$$vi) \quad I = \frac{m}{L} \left(\frac{1}{3} \left(\frac{L}{2} \right)^3 - \frac{1}{3} \left(-\frac{L}{2} \right)^3 0 \right) = \frac{m}{3L} \left(\frac{L^3}{4} \right)$$

$$vii) \quad I = \boxed{\frac{1}{12}mL^2}$$

$$E_k = \frac{1}{2} I * \omega^2$$

$$I = k * m * r^2$$

$$\frac{1}{2} < k < 1$$

$$\omega = RPM * \frac{\pi}{30}$$