

**Área:** Inovação | **Tema:** Temas Emergentes em Inovação

**NOVA E PROMISSORA TECNOLOGIA PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA GRAVITACIONAL  
APLICADO À GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

**MATH SIZING OF A NEW AND PROMISING GRAVITATIONAL ENERGY STORAGE TECHNOLOGY  
APPLIED TO PHOTOVOLTA GENERATION**

Ana Cristina Ruoso e Nattan Roberto Caetano

**RESUMO**

A energia elétrica das células fotovoltaicas é produzida em um curto período de baixa demanda e apresenta altos níveis de intermitência. A solução é armazenar a energia e convertê-la em uma forma mais estável, a fim de transformar novamente em eletricidade durante períodos de alta demanda, nos quais a energia tem um valor maior. Esse processo proporciona uma viabilidade econômica para a maioria dos projetos de armazenamento de energia, mesmo para os menos eficientes e mais comuns, como as baterias. Portanto, o objetivo do trabalho é descrever o dimensionamento de um novo e promissor sistema de armazenamento de energia potencial gravitacional, com base em princípios de armazenamento de energia já existente. O desenvolvimento desta metodologia para armazenamento de energia apresenta o dimensionamento matemático do sistema. Além disso, apresenta algumas patentes de armazenadores similares ao proposto. Esse sistema não utiliza água para seu funcionamento, pode ser construído juntamente com prédios e dependendo do interesse não requer distribuição na rede. Além disso, o sistema possui potencial para ter uma alta densidade de armazenamento, longa vida útil, e alta eficiência. Portanto, o uso desse armazenador otimizaria o fornecimento e utilização de energia, além de aumentar a autossuficiência de energia das residências.

**Palavras-Chave:** energia solar; energia gravitacional; sistema de armazenamento.

**ABSTRACT**

The electrical energy of photovoltaic cells is produced in a short period of low demand and has high levels of intermittence. The solution is to store energy and convert it into a more stable form in order to turn it back into electricity during periods of high demand when energy is of the highest value. This process provides economic viability for most energy storage projects, even for the least efficient and most common, such as batteries. Therefore, the objective of the paper is to describe the design of a promising new gravitational potential energy storage system, based on existing energy storage principles. The development of this energy storage methodology presents the mathematical sizing of the system. In addition, it presents some similar store patents. This system does not use water for its operation, can be built together with buildings and depending on interest does not require distribution in the network. In addition, the system has the potential for high storage density, long service life, and high efficiency. Therefore, the use of this storage unit would optimize energy supply and utilization, as well as increase the energy self-sufficiency of homes.

**Keywords:** solar energy; gravitational energy; storage system.

# **DIMENSIONAMENTO MATEMÁTICO DE UMA NOVA E PROMISSORA TECNOLOGIA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA GRAVITACIONAL APLICADO A GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

## **MATH SIZING OF A NEW AND PROMISING GRAVITATIONAL ENERGY STORAGE TECHNOLOGY APPLIED TO PHOTOVOLTA GENERATION**

### **RESUMO**

A energia elétrica das células fotovoltaicas é produzida em um curto período de baixa demanda e apresenta altos níveis de intermitência. A solução é armazenar a energia e convertê-la em uma forma mais estável, a fim de transformar novamente em eletricidade durante períodos de alta demanda, nos quais a energia tem um valor maior. Esse processo proporciona uma viabilidade econômica para a maioria dos projetos de armazenamento de energia, mesmo para os menos eficientes e mais comuns, como as baterias. Portanto, o objetivo do trabalho é descrever o dimensionamento de um novo e promissor sistema de armazenamento de energia potencial gravitacional, com base em princípios de armazenamento de energia já existente. O desenvolvimento desta metodologia para armazenamento de energia apresenta o dimensionamento matemático do sistema. Além disso, apresenta algumas patentes de armazenadores similares ao proposto. Esse sistema não utiliza água para seu funcionamento, pode ser construído juntamente com prédios e dependendo do interesse não requer distribuição na rede. Além disso, o sistema possui potencial para ter uma alta densidade de armazenamento, longa vida útil, e alta eficiência. Portanto, o uso desse armazenador otimizaria o fornecimento e utilização de energia, além de aumentar a autossuficiência de energia das residências.

**Palavras-chave:** energia solar; energia gravitacional; sistema de armazenamento.

### **ABSTRACT**

The electrical energy of photovoltaic cells is produced in a short period of low demand and has high levels of intermittence. The solution is to store energy and convert it into a more stable form in order to turn it back into electricity during periods of high demand when energy is of the highest value. This process provides economic viability for most energy storage projects, even for the least efficient and most common, such as batteries. Therefore, the objective of the paper is to describe the design of a promising new gravitational potential energy storage system, based on existing energy storage principles. The development of this energy storage methodology presents the mathematical sizing of the system. In addition, it presents some similar store patents. This system does not use water for its operation, can be built together with buildings and depending on interest does not require distribution in the network. In addition, the system has the potential for high storage density, long service life, and high efficiency. Therefore, the use of this storage unit would optimize energy supply and utilization, as well as increase the energy self-sufficiency of homes.

**Keywords:** solar energy; gravitational energy; storage system.

## **1 INTRODUÇÃO**

A geração de eletricidade a partir de fontes renováveis cresceu rapidamente devido à promoção de políticas de energia limpa em muitos países (REN et al., 2017; KOUSKSOU et al., 2014). O aumento da demanda por energia, sem o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> e sem a dependência exclusiva de recursos finitos, como combustíveis fósseis, tornou o desenvolvimento de tecnologias avançadas de energia renovável uma necessidade global (MOHAMMED et al., 2018; ZAOUCHE et al., 2017).

Os desenvolvimentos da tecnologia de energia fotovoltaica levam a custos de fabricação mais baixos, o que permite que a energia solar ocupe um percentual maior de geração de energia elétrica em um futuro próximo (REDDY, 2017; GRZESIAK, 2016). Com isso, a eletricidade fotovoltaica é uma das melhores opções para as necessidades energéticas do mundo (MASON, 2015; JU et al., 2017). Contudo, a energia solar é uma fonte variável, intermitente e geralmente dispersa quando comparada a instalações de produção de energia em larga escala, como usina hidrelétricas e termoelétricas (SUBERU; MUSTAFA; BASHIR, 2014; ONDECK; EDGAR; BALDEA, 2018).

Como resposta a intermitência e para fazer o melhor uso dessa fonte de energia, são utilizados sistemas de armazenamento de energia (SINGH; SINGH; KAUSHIK, 2016). Esse sistema opera no pico de poda, transfere o excesso de geração para as horas de ponta e “diminui” os picos de demanda. Assim, a energia gerada pelas instalações solares fotovoltaicas durante a manhã, durante as horas de baixa demanda, pode ser armazenada e implantada à noite, quando a demanda de energia é alta e o custo da energia elétrica é mais elevado. Isso é particularmente relevante para usuários residenciais, cujo padrão de demanda de eletricidade mostra mudanças consideráveis durante o dia (AKINYELE; RAYUDU, 2014; PARASTEGARI et al., 2015)

O uso de sistemas de armazenamento de energia aumenta a confiabilidade energética, segurança, suporta uma maior integração de energia renovável, compensa os níveis de intermitência e pode levar a um uso mais eficiente das fontes de energia renováveis, evitando a interrupção do sistema por meio de fluxos intermitentes de eletricidade (AKBARI et al., 2018; CASTILLO; GAYME, 2014). Os benefícios potenciais das tecnologias de armazenamento integrado à rede incluem a redução da necessidade de nova capacidade de transmissão e/ou geração, melhorando a carga, fornecendo reserva giratória, corrigindo frequência, voltagem e fatores de energia, bem como as vantagens ambientais indiretas (GONZATTI, FARRET, 2017; ROHIT, RANGNEKAR, 2017).

O armazenamento de energia é classificado em mecânico, elétrico, eletroquímico e armazenamento de hidrogênio (DOSTÁL; LADÁNYI, 2018). Os sistemas eletroquímicos, principalmente as baterias ácidas, são os acumuladores mais utilizados no armazenamento de energia fotovoltaica (AMIRANTE et al., 2017; AISSOU et al., 2017). A grande parte das pesquisas com acumuladores de energia solar objetivam encontrar uma maneira eficiente de armazenar energia, mas consideram somente o armazenamento convencional com baterias. No entanto, a utilização de bateria requer um custo inicial alto, não são rentáveis, não suportam altas taxas de ciclagem e não armazenam grandes quantidades de energia em um pequeno volume (MCKENNA et al., 2013; BALCOMBE; RIGBY; AZAPAGIC, 2014). Além disso, existe o impacto da depleção de metais, durante a produção de baterias, e, também, os impactos na mudança climática e do consumo de combustíveis fósseis, que acontecem com o uso das baterias (MCMANUS, 2012; HAWKES, 2010).

Cada sistema de armazenamento de energia tem suas próprias características específicas de resposta temporal, limite de quantidade de energia armazenada, nível de energia, ciclos de carga e descarga, densidade de energia, vida útil, eficiência, impacto ambiental, custo, maturidade tecnológica etc. Essas características devem ser levadas em consideração em todas as aplicações de energia (AZHGALIYEVA, 2019). Dessa maneira, o objetivo do trabalho é descrever o dimensionamento de um novo e promissor sistema de armazenamento de energia potencial gravitacional, com base em princípios de armazenamento de energia já existentes. Na seção 2 Fundamentação técnica são apresentadas algumas patentes e uma revisão demonstra o princípio de funcionamento e características de alguns métodos de armazenamento da literatura que utilizam o princípio da energia potencial gravitacional. A seção 3 apresenta o dimensionamento matemático do sistema de armazenamento de energia gravitacional. Por fim, a seção 4 apresenta as conclusões extraídas do trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA

A análise dos sistemas de armazenamento requer a avaliação de várias características, já que diferentes recursos renováveis terão requisitos únicos de integração e serviços de rede, dependendo de vários detalhes, como o tipo e a localização da fonte renovável. Esta seção apresenta algumas tecnologias de armazenamento de energia por gravidade da literatura e algumas patentes que são similares ao sistema apresentado neste trabalho.

### 2.2 TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO GRAVITACIONAL NA LITERATURA

O armazenamento hidrelétrico bombeado (PHES) é atualmente o método de armazenamento mais utilizado com mais de 99% da capacidade de armazenamento de energia a granel do mundo (REHMAN et al., 2015). Em suma, o sistema armazena energia na forma da energia potencial da água no reservatório mais alto, para o qual a água é bombeada fora do horário de pico. A água é liberada para o reservatório inferior através de turbinas para gerar energia elétrica durante períodos de alta demanda.

O UPHES é uma alternativa de armazenador quando o PHES não é adequado. O UPHES possui o mesmo princípio de funcionamento que o anterior, porém pelo menos um dos seus reservatórios pode ser subterrâneo. O que garante um alto deslocamento vertical seja possível sem consumir uma grande área de superfície (MENÉDEZ et al., 2019; WINDE; KAISER; ERASMUS, 2017; PUJADES et al., 2016)

No sistema de armazenamento oceânico subaquático (UOSS) o armazenamento é projetado para funcionar juntamente com uma usina de energia renovável flutuando no mar (uma usina fotovoltaica flutuante ou turbina eólica) (CAZZANIGA et al, 2017; SLOCUM et al., 2013). O sistema de armazenamento consiste de uma embarcação submersa (por exemplo, um grande tanque ou um conjunto de tubos / cilindros ou uma esfera de concreto oco), uma turbina reversível acoplada à embarcação e um cabo elétrico que conecta a turbina à unidade geradora. A embarcação submersa está ancorada ao fundo do oceano e a água é bombeada para fora da embarcação durante o ciclo de carregamento e retorna para a embarcação quando descarregada. O tamanho do sistema de armazenamento será completamente dependente da unidade geradora.

A tecnologia Gravity Power Module (GPM) utiliza um pistão muito grande suspenso em um poço profundo, cheio de água e um tubo de retorno conectado a uma turbina-bomba (GRAVITY POWER, 2017; LOUDIYI; BERRADA, 2017). O sistema funciona em circuito fechado, durante o carregamento a eletricidade fora do horário de pico é usada para acionar o motor que bombeia a água através do tubo de retorno, levantando o pistão no eixo. Enquanto, no modo de descarga o pistão cai forçando a água de volta através do tubo de retorno e da turbina que aciona o gerador e transforma a energia potencial em energia elétrica. A quantidade de energia armazenada por essa tecnologia varia de acordo com o tamanho do pistão e a altura do eixo. O objetivo da empresa Gravity Power é fornecer energia na faixa de 40MW a 1,6 GW (GRAVITY POWER, 2017).

Armazenamento avançado de energia ferroviária (ARES) é uma tecnologia de acionamento por tração baseada em trilhos usa energia renovável excedente ou eletricidade de baixo custo da rede para mover uma massa, na forma de blocos de concreto, para uma maior altitude, por transporte ferroviário. Os blocos descem sob gravidade quando o sistema está sendo descarregado. Cada bloco pesa cerca de 45-64 ton e realizada uma rota de 16 km (LETCHER; LAW; REAY, 2016). O sistema tem uma eficiência prevista de 78-80%, sem perdas de armazenamento com auto-descarga e uma duração de 40 anos. A ARES LLC tem um projeto piloto em Tehachapi, Califórnia e atualmente está construindo o primeiro projeto

comercial em Nevada, um sistema de 50 MW, 12,5 MWh, com uma trilha de 9,3 km e uma massa de transporte de 780 ton (ARES, 2019).

A tecnologia de armazenamento denominada como Gravitricidade é baseada em levantar/ abaixar verticalmente uma massa pesada ao longo de um eixo no solo (Gravitricity, 2019; BLAIR, 2016). Os pistões tem uma massa de até 3000 ton e os eixos vão até 1500 m de profundidade, esses eixos podem ser de minas existentes ou eixos construídos (BLAIR, 2016). Dessa maneira, a massa é levantada com um sistema de cabos-guia, cabos e sistemas de guincho, semelhantes aos sistemas de elevação usados em minas. O Armazenamento de Energia do Mar Profundo (MGH) elimina a necessidade da infraestrutura do eixo, porque é utilizado uma plataforma flutuante no mar para levantar/abaixar as massas (MGH, 2015).

O PHES é o mais tradicional, consolidado e amplamente utilizado para armazenar energia. As vantagens desse sistema são larga escala de armazenamento, alto potencial de armazenamento de energia, longo prazo de armazenamento. Todavia, apresenta baixa densidade de energia, que exige para sua instalação e funcionamento uma topografia adequada, grandes reservatórios de água e elevada variação de altura entre eles. Dessa maneira, sua implantação causa grandes impactos ambientais, necessita da aceitabilidade social, ambiental e da confirmação da viabilidade econômica do alto investimento. Isso também ocorre com o UPHES, que ainda conta com elevados custos aplicados nos trabalhos subterrâneos.

O GPM e ARES são tecnologias de armazenamento adequadas para aplicações em grande escala, pois são escalonáveis e também baseadas em componentes mecânicos amadurecidos. Elas também são adequadas para armazenamento de longa duração, pois têm baixa taxa de auto descarga. Além disso, quando comparado aos outros sistemas de armazenamento por gravidade o GPM é que apresenta maior densidade de energia e densidade de potência (ANEKE; WANG, 2016).

O GPM tem custo de capital por kWh igual ou ligeiramente maior do que o PHES quando totalmente amadurecido, pois são baseadas em conceito similar. Além disso, se o GPM atingir a eficiência de ida e volta reivindicada (75-80%), quando amadurecido, pode ser uma boa alternativa ao PHES em locais sem topografia favorável (BERRADA; LOUDIYI; ZORKANI, 2017). Enquanto, o ARES sofre a mesma restrição topológica que o armazenamento hidro bombeado. Porém, o ARES pode se tornar uma boa alternativa ao PHES para aplicação em larga escala em locais com a topografia necessária, mas sem abastecimento adequado de água (SANDRU, 2012).

A Gravitricidade tem uma eficiência prevista de cerca de 80-90%, vida útil maior que 50 anos e tempo de descarga de até 2 h. Em comparação com outras tecnologias de armazenamento de energia por gravidade, o uso de pesos suspensos exige um uso mínimo da terra e pode fazer uso de escavações existentes (BOTH; KAMPER, 2019; MORSTYN; CHILCOTT; MCCULLOCH, 2019). Além disso, esse armazenador pode ser combinado com ar comprimido, ao selar o eixo, o espaço pode ser usado simultaneamente como um recipiente de pressão para ar comprimido, aumentando a quantidade de energia armazenada em até três vezes (BLAIR, 2016).

## 2.1 VERIFICAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO GRAVITACIONAL NO SISTEMA DE PATENTES

A “*Hybrid vertical energy storage system (US20120019008)*” é um sistema de armazenamento de energia híbrido elétrico, hidráulico e gravitacional. A gravidade opera dispositivos mecânicos que podem ajudar a movimentar um volume de fluido para comprimir um gás e armazenar energia potencial. Essa invenção utiliza princípios de funcionamento do CAES e da PHES. Em uma das suas formas, o sistema de armazenamento de energia inclui pelo menos um motor elétrico ligado a uma fonte de alimentação elétrica, e um tambor de

enrolamento de cabos de forma cilíndrica rotativamente ligado e acionado pelo motor elétrico. O tambor de enrolamento de cabos é disposto perto do topo da estrutura, esta estrutura pode ter uma altura suficiente para suportar as modalidades operacionais da invenção (HUGHEY, 2012). Essa invenção está representada na Figura 1a.

Assim como a anterior a patente “*Constant pressure energy storage hydraulic pump* (CN101644243)” consiste numa bomba hidráulica de armazenamento de energia. Essa invenção é caracterizada pela gravidade gerada pelo ressalto e queda quando os veículos circulam. Uma pluralidade de conexões em série é adotada para armazenar a gravidade de movimento de veículos, e um motor hidráulico é usado para gerar eletricidade. A invenção pode armazenar e converter força inércia instantânea em força real para trabalhar continuamente ou converter em outra energia, como representado na Figura 1b (CHUANSHENG, 2010).

Na patente “*Method for generation of energy from of mobile masses* (DE000004417925)”, representada na Figura 1c, a energia é gerada durante movimentos de massa na superfície, devido a alterações dependentes da gravidade na distância até o centro da Terra. Esta energia é fornecida por uma massa, essa massa é movida em uma superfície e acelerada em direção ao centro de gravidade. A energia é transmitida para um meio de armazenamento, que é capaz de ingestão ou descarga repetida de energia. Em alternativa, é fornecido a um dispositivo para conversão em energia mecânica e / ou elétrica e / ou química e / ou magnética (PAUL, 1995).

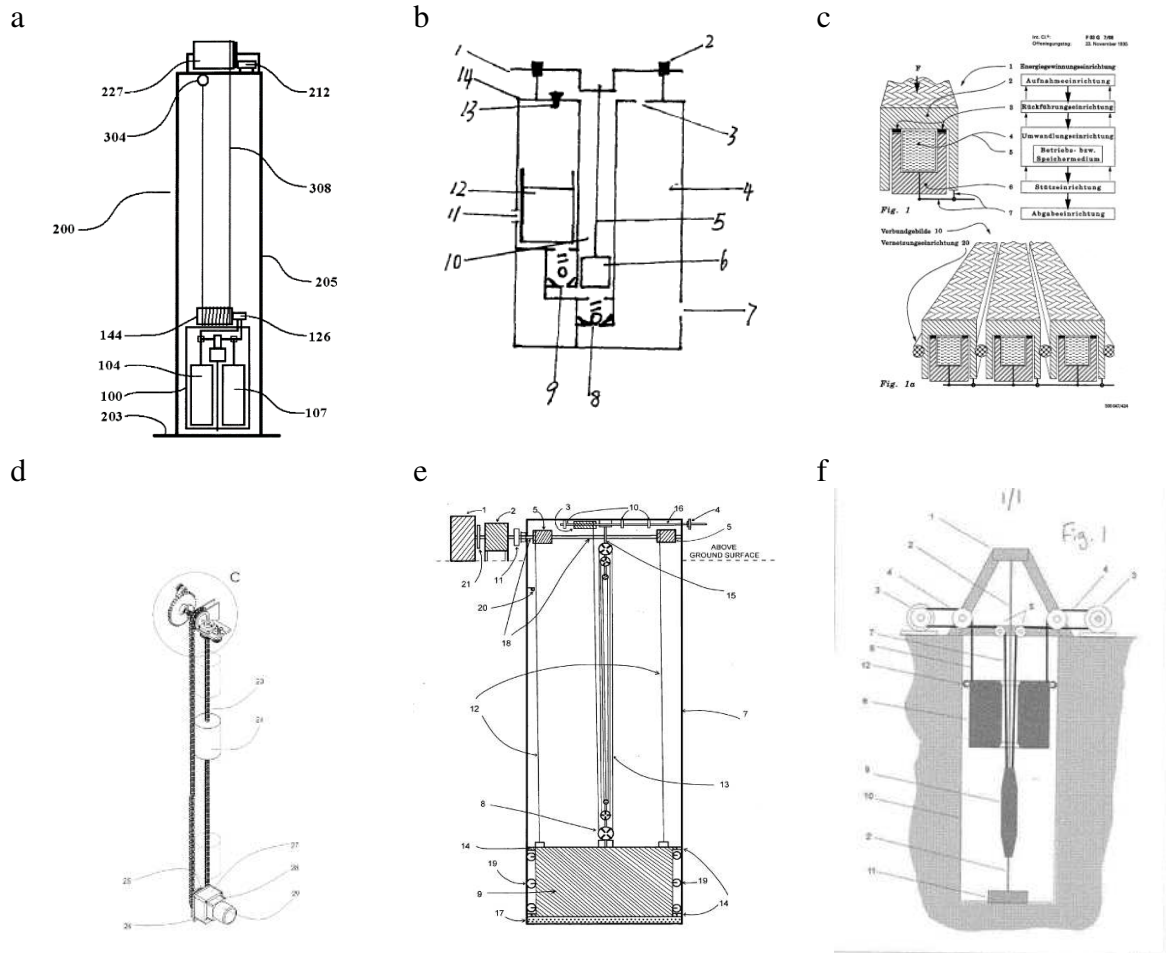
A “*Self-generating railway road lamp for generating power by using gravity potential energy and suction force* (CN103868007)” é uma lâmpada rodoviária ferroviária auto-geradora, que gera energia usando energia potencial de gravidade e força de sucção, sendo o sistema completo um armazenador de energia gravitacional. Quando um trem de alta velocidade passa, os dispositivos oscilantes balançam sob a ação da força de sucção, os geradores de energia potencial gravitacional são usados para acumular energia potencial gravitacional sob a ação da força oscilante. A energia potencial gravitacional é armazenada levantando objetos pesados, conforme a Figura 1d. A energia potencial da gravidade é regulada e controlada por um dispositivo mecânico de regulação do tempo. Assim, à noite é liberada a energia potencial da gravidade para os geradores de energia, e a energia é fornecida às luzes da estrada para iluminação (JING, 2014).

A “*Gravity energy storage and generating device* (US20120085984)” é um dispositivo de armazenamento e geração de energia por gravidade, apresentado na Figura 1e. O dispositivo é instalado no solo ou acima, onde a gravidade desempenha um papel vital na geração e armazenamento, uma grande massa de pistão de concreto revestido de aço inoxidável que se encaixa em um cilindro longo. Ambas as extremidades do referido pistão são seladas com dois anéis de vedação de borracha no topo do pistão e o fundo do pistão contra as paredes do cilindro. Os cilindros superior e inferior são completamente vedados. O ponto de descanso do pistão, na parte inferior do cilindro, é uma almofada acolchoada com molas de borracha para suavizar a queda do pistão durante a geração de eletricidade. Como os cabos de aço presos no topo pistão é puxados por meio de polias. Para o pistão de concreto atingir o topo, as forças da gravidade, vácuo e pressão do ar são aplicadas nele. Quando o pistão desce para baixo, o eixo conectado à caixa de engrenagens começa a girar, girando o gerador, convertendo a energia potencial em elétrica (DAYA, 2014).

A patente “*Apparatus and method for electrical energy storage based on the potential energy of a vertically moving massive weight* (WO2018134620)” refere-se a um sistema de armazenamento de energia elétrica, com um mínimo perdas e destinado a exportar essa energia quando necessário. Basicamente o sistema compreende um peso suspenso por cabos, que se move verticalmente em um eixo de mina ou vala, conforme a Figura 1f. Cada cabo é conectado a um guincho de tal forma que possam ser operados simultaneamente e harmoniosamente, a fim de elevar ou abaixar o peso de tal maneira que a carga seja compartilhada aproximadamente

igualmente entre os guinchos. Os cabos podem ser de aço ou sintéticos. Os guinchos incluem um acionamento elétrico para fazer interface com a rede elétrica e, de preferência, uma caixa de câmbio e um freio. É possível usar uma interface de acionamento hidráulico com um gerador acionado por motor hidráulico para converter energia hidráulica em energia elétrica. O acionamento elétrico ou hidráulico opera como um motor ou fonte de energia para elevar o peso e como um gerador de energia quando o peso desce (FRANKLIN; FRAENKEL, 2018).

Figura 1- Desenhos das patentes dos sistemas de armazenamento por gravidade.

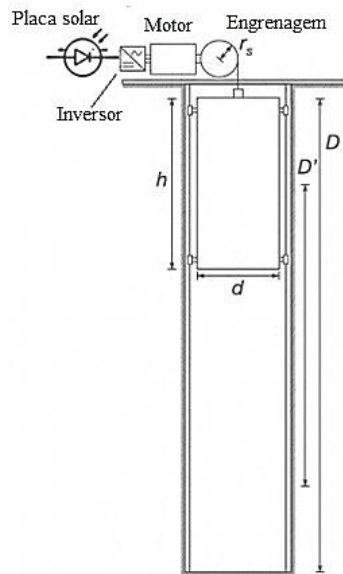


Fonte: Hughey (2012), Chuansheng (2010), Paul (1995), Jing (2014), Daya (2014), Franklin e Fraenkel (2018).

### 3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

Nesta seção é apresentada a proposta de um sistema de armazenamento gravitacional e seu dimensionamento. Esse sistema foi baseado no princípio de funcionamento da Gravitricidade (Gravitricity, 2019). Para o desenvolvimento desse acumulador serão considerados: placas solares fotovoltaicas, um motor elétrico, sistema de engrenagens e polias e um corpo de grande massa. A Figura 1 mostra o desenho do sistema de armazenamento de energia por gravidade.

Figura 1- Sistema de armazenamento de energia por gravidade para pequena escala utilizando peso suspenso.



Fonte: adaptado Morstyn, Chilcott e McCulloch (2019).

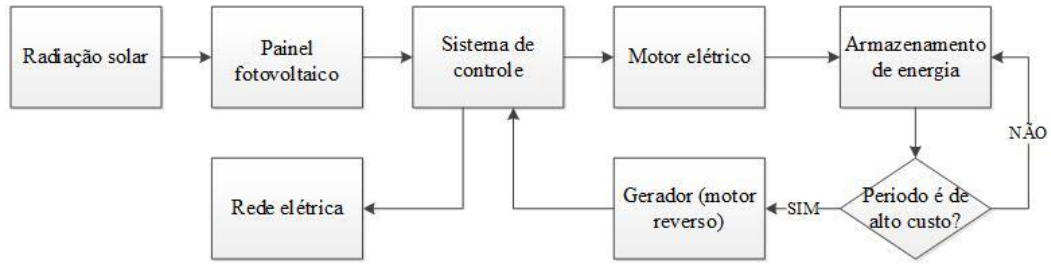
Na Figura 1,  $h$  é a altura do peso suspenso,  $d$  é o diâmetro do pistão,  $D$  é a profundidade do eixo,  $D'$  é a profundidade utilizável para o armazenamento de energia e  $r_s$  é o raio da roldana de tração. Em suma, esse sistema funciona da seguinte forma: no período de sol o painel fotovoltaico recebe radiação solar, os elétrons quando atingidos por essa radiação se movimentam e geram uma corrente elétrica nas células do painel. A corrente elétrica juntamente com a tensão geram uma potência nos terminais da célula fotovoltaica. Um inversor transforma a corrente elétrica contínua em corrente alternada para utilização na rede.

A energia elétrica derivada desses processos é utilizada em um motor elétrico, esse motor transforma então a energia elétrica em energia mecânica que atua no levantando de uma massa utilizando um sistema de polias, que visa facilitar a subida. À medida que a massa sobe a energia potencial aumenta, quando essa massa chega ao topo, a energia então é armazenada na forma de energia potencial mecânica. Quando a demanda de energia aumenta, em períodos com ausência do sol, como a noite, que geralmente apresentam um custo mais alto da energia elétrica da rede, essa massa é liberada para a descida. Ela está associada a um sistema de engrenagens, que atuam sob o motor de forma reversa.

Durante o período em que a massa desce a energia potencial se transforma em energia cinética, o que resulta na rotação das engrenagens. Com a conservação da energia, um dos elementos realiza trabalho em outro e, assim, consecutivamente, transmitindo torque. Essa transmissão aumenta a velocidade, já que o sistema de é composto por “ $n$ ” engrenagens que diminuem de tamanho até chegar no motor. Com isso, a energia cinética gerada durante a descida da massa “ $m$ ” é transformada em energia elétrica pelo movimento das engrenagens acionando o motor de forma reversa. Esse movimento do motor cria uma corrente elétrica que finalmente é transmitida para a rede. A Figura 2 representa a ideia geral do sistema.

Figura 2 - Fluxograma simplificado do sistema de acumulação de energia.





Fonte: autores.

### 3.1 DOMÍNIO SOLAR

A fim de determinar a quantidade de energia gerada no sistema fotovoltaico são apresentados a seguir as equações. A Equação 1 representa o fluxo de energia:

$$F = \frac{\partial U}{\partial t} \quad (1)$$

onde,  $F$  é o fluxo radiante (W),  $\partial U$  é a energia irradiada e  $\partial t$  é o intervalo de tempo. A irradiância é definida pela Equação 2:

$$I = \frac{\partial F}{\partial A} \quad (2)$$

onde,  $I$  é a irradiância ( $W/m^2$ ), que é o fluxo pela variação de área. Como iremos utilizar uma placa solar, essa tem uma forma retangular, a sua área é representada pela Equação 3:

$$A = B \cdot H \quad (3)$$

onde,  $A$  é a área ( $m^2$ ),  $B$  é a base e  $H$  é a altura. Além disso, para o cálculo da irradiância é necessário considerar a inclinação da placa, as coordenadas geográficas que o sistema está situado, o fator de forma e a difusão da radiação. Então, a Equação 4 apresenta essas variáveis:

$$I_{\beta} = I \left( 1 - \frac{I_d}{I} \right) R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (4)$$

onde,  $I_{\beta}$  é a radiação solar em um plano inclinado ( $W/m^2$ ),  $I$  é radiação solar em uma superfície horizontal ( $W/m^2$ ),  $I_d$  é a radiação solar difusa em uma superfície horizontal ( $W/m^2$ ),  $R_b$  é o fator geométrico (razão entre a radiação solar direta sobre uma superfície inclinada e radiação solar direta sobre um plano horizontal),  $\beta$  é o ângulo de inclinação em relação ao plano horizontal e  $\rho$  é o albedo. Assim, com a Equação 5 é calculado a dose que é a energia total recebida pela placa num intervalo de tempo que nesse caso será 12 h que equivale ao tempo que o sol nasce e se põe. Enquanto, a Equação 6 corresponde a energia gerada.

$$D = \int_{\Delta t} I \cdot \Delta t \cong I \Delta t \quad (5)$$

$$E_g = Pot \cdot \Delta t \quad (6)$$

Onde,  $E_g$  é a energia gerada (Wh),  $Pot$  é a potência e  $\Delta t$  corresponde as horas que a placa recebeu sol. A determinação da energia gerada pelo painel solar também é descrita pela Equação 7:

$$E_g = \frac{Con}{\eta_I \cdot \eta_F \cdot \eta_S} \quad (7)$$

onde,  $Con$  é o consumo diária de energia (Wh),  $\eta_I$  é a eficiência do inversor,  $\eta_F$  corresponde as perdas da fiação e  $\eta_S$  é o rendimento do acumulador. Enquanto a potência instalada pode ser calculada pela Equação 8:

$$Pot = \frac{E_g}{SP} \quad (8)$$

onde,  $Pot$  é dado em W,  $SP$  corresponde as horas máximas de radiação representada pela Equação 9:

$$SP = \frac{I_m}{I_c} \quad (9)$$

onde, na Equação 9,  $SP$  é representado em horas,  $I_m$  é a irradiância média solar diária média incidente no pior mês ( $W/m^2$ ) e  $I_c$  é a irradiância constante, considerada igual a  $1000 W/m^2$ . Com isso, a energia anual gerada pelo painel é expressa pela Equação 10:

$$E_G = Pot \cdot FC \cdot 8760 \cdot DI \quad (10)$$

onde,  $FC$  é o fator de capacidade do sistema ( $INS/24$ ),  $8760$  corresponde a quantidade total de horas em um ano e  $DI$  disponibilidade do sistema, ou seja, o número de horas/ano em que o sistema está disponível.

### 3.2 DOMÍNIO ENERGIA MECÂNICA

A energia mecânica é a soma da energia cinética com a energia potencial, conforme a Equação 11:

$$E_m = E_c + E_p \quad (11)$$

onde,  $E_m$  representa energia mecânica,  $E_c$  energia cinética e  $E_p$  energia potencial, Equação 12 e 13, respectivamente. Nessas equações  $m$  é a massa,  $v$  a velocidade,  $r$  o raio,  $g$  a aceleração da gravidade e  $h$  a altura.

$$E_c = m \frac{v^2}{r} \quad (12)$$

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (13)$$

#### 3.2.1 Peso suspenso

Assume-se que o sistema usa um peso cilíndrico. Dessa forma, a capacidade de armazenamento de energia do sistema é dada pela derivação da equação 13 na Equação 14:

$$E_{ES} = \eta_{ES} \cdot g \cdot m \cdot D' \quad (14)$$

onde,  $E_{ES}$  é dado em J,  $\eta_{ES}$  é a eficiência de ida e volta do sistema,  $m$  é a massa do peso (kg),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $9,8 m/s^2$ ) e  $D'$  é a profundidade utilizável do eixo para armazenar energia (m). A conversão entre Joule (J) e Watt-hour (Wh) é feita como na equação 15.

$$1 Wh = 3600 J \quad (15)$$

Assim, a energia armazenada pode ser escrita em Wh com a equação 16.

$$E_{ES} = 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot (\eta_{ES} \cdot g \cdot m \cdot D') \quad (16)$$

O volume do peso,  $V$ , é dado pela altura  $h$  do cilindro e o seu diâmetro  $d$ , conforme a Equação 17.

$$V = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{4} \quad (17)$$

Para um peso feito de um material com densidade  $\rho$ , a massa do peso,  $m$ , é expressa conforme a Equação 18.

$$m = \rho \cdot V \quad (18)$$

Para um eixo com profundidade  $D$ , a profundidade utilizável do eixo para elevar o peso é representada pela Equação 19.

$$D' = D - h = D - \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot d^2 \cdot \rho} \quad (19)$$

Dessa maneira, a capacidade total de armazenamento de energia (Wh) também pode ser expressa pelas Equações 20 e 21.

$$E_{ES} = 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot \left[ \eta_{ES} \cdot (m \cdot g \cdot D - \frac{4 \cdot m^2 \cdot g}{\pi \cdot d^2 \cdot \rho}) \right] \quad (20)$$

$$E_{ES} = 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot \eta_{ES} \cdot \rho \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot h \cdot g \cdot D \quad (21)$$

Quando a altura do peso cilíndrico é aumentada e o seu diâmetro é mantido constante, consequentemente aumenta a massa, todavia reduz a profundidade utilizável do eixo, criando um trade-off para a capacidade de energia. Dessa maneira, a altura do pistão deve ser a mínima possível afim de aumentar a capacidade de armazenamento.

Quanto aos cabos de aço do sistema, foi assumido que o comprimento da haste ( $l_r$ ) é a mesma que a altura  $a$  que o êmbolo se desloca (profundidade utilizável), ou seja,  $l_r = D'$ . Além disso, o diâmetro do pistão ( $d$ ) é aproximadamente o mesmo que o diâmetro do eixo, isto é,  $d \approx d_{\text{eixo}}$ .

### 3.3 DOMÍNIO ENERGIA ELÉTRICA

A força necessária para levantar o bloco de massa é expressa pela Equação 22:

$$F = m \cdot g + m \cdot a \quad (22)$$

onde,  $a$  é a aceleração do peso, sendo  $a = dt/dv$ . O torque do motor é dado pela Equação 23:

$$T = F \cdot r_s + J \frac{d\omega}{dt} = m \cdot g \cdot r_s + m \cdot a \cdot r_s + \frac{J}{r_s} \cdot a \quad (23)$$

onde,  $\omega$  é a velocidade angular, sendo  $\omega = v/r_s$ ,  $J$  é a inércia rotacional e  $r_s$  é o raio da engrenagem. A potência do motor elétrico, representada pela Equação 24, é obtida multiplicando a Equação 23 por  $\omega$ :

$$P_m = m \cdot g \cdot v + \left(m + \frac{J}{r_s^2}\right) \cdot v \cdot a \quad (24)$$

A Equação 25 representa o poder de estado estacionário para manter uma velocidade constante.

$$P_{SS} = m \cdot g \cdot v \quad (25)$$

O sistema de armazenamento de energia deve ser capaz de fornecer energia dentro de um determinado tempo de resposta. Para isso a Equação 26 assumi aceleração constante do peso.

$$a = \frac{v}{T} = \frac{P_{SS}}{m \cdot g \cdot T} \quad (26)$$

A potência máxima em um curto intervalo de tempo é representada pela equação 27:

$$\bar{P} = P_{SS} + \left(\frac{1}{m \cdot g^2 \cdot T} + \frac{J}{r_s^2 \cdot m^2 \cdot g^2 \cdot T}\right) \cdot P_{SS} \quad (27)$$

### 3.4 BENEFÍCIOS E APLICAÇÕES

O principal benefício do sistema está relacionado com os agregados familiares, as casas equipadas com esse sistema de armazenamento juntamente com a geração fotovoltaica podem reduzir a energia extraída da rede e, conseqüentemente, aumentar a sua autossuficiência. A instalação desse sistema é prática e fácil, pode ser realizada juntamente com o projeto de qualquer estabelecimento (residencial, comercial ou industrial). Dessa maneira, o sistema é uma forma eletromecânica e sem água de armazenamento de energia, sem limitações geográficas/topográficas, como uma mina ou reservatório de água. Além disso, o sistema de armazenamento não precisa ser conectado à rede elétrica nem distribuir energia, sendo offered Grid, assim, a tensão elétrica não precisa ser aumentada e não requer transformador.

Esse sistema de armazenamento de energia é somente conceitual, não existe nenhuma infraestrutura comercial dele. Todavia, alguns autores realizaram pesquisas com sistemas similares e calcularam algumas características fundamentais. Dessa forma, esse tipo de sistema tem potencial de ter alta densidade de energia e densidade potência, eficiência de ida e volta entre 80 e 90%, tempo de resposta de segundos, tempo de descarga de menos de 2 horas e vida útil de mais de 50 anos. A quantidade de potência e capacidade de armazenamento de energia são determinados pela aplicação final do sistema, mas essas características podem ser de até alguns MW e MWh (GRAVITRICITY, 2019; MORSTYN; CHILCOTT; MCCULLOCH, 2019; BOTH; KAMPER, 2019).

Para aplicações em pequena escala, como em casas, prédios ou indústria, o fator que mais impacta na capacidade de armazenamento de energia é a densidade do bloco de massa, que muda dependendo do material que é feito. Isso porque em aplicações de pequena escala a a profundidade do eixo e o diâmetro do peso são pequenos. Nesse cenário, quando a densidade

aumenta, a massa também aumenta e, conseqüentemente, a capacidade de energia aumenta, mesmo existindo restrição de tamanho de diâmetro e profundidade.

Enquanto, quando o armazenamento de energia é destinado a grande escala, o fator que mais influencia a capacidade de armazenamento é o diâmetro e profundidade do eixo. Pois, mesmo não aumentando a massa do bloco, mas aumentando significativamente o diâmetro do peso e a profundidade do eixo, o peso percorre uma altura maior, armazenando mais energia.

#### 4 CONCLUSÃO

Este artigo apresentou o dimensionamento de um sistema de armazenamento de energia baseado em gravidade, usando pesos suspensos como uma nova e promissora tecnologia de armazenamento. Além disso, potenciais benefícios e aplicações do sistema proposto foram apresentados. Também, o princípio de funcionamento de outros armazenadores e patentes foram apresentados.

O sistema proposto é uma forma eletromecânica que exige uso mínimo da terra e não utiliza água para seu funcionamento, com requisitos geográficos menos rigorosos do que os armazenadores tradicionais. Além disso, apresenta vantagens quanto a instalação, já que pode ser construído juntamente com prédios e dependendo do interesse não requer distribuição na rede. Esse novo sistema tem potencial para ter uma alta densidade de armazenamento, um tempo de descarga de minutos, tempo de vida de 50 anos e uma eficiência por volta de 90%, o que otimizaria o fornecimento e utilização de energia, além de aumentar a autossuficiência de energia das residências.

O sistema por gravidade proposto é uma tecnologia de armazenamento viável e promissora. Porém, pesquisas e estudos sobre viabilidade, modelagem, dimensionamento e análises de sensibilidade serão necessários para obter uma compreensão mais detalhada do desafio envolvido no amadurecimento e desenvolvimento prático dessa proposta. Com isso, será possível comparar adequadamente suas características e custos com as outras opções de armazenamento de energia já existentes.

#### AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

#### REFERÊNCIAS

AISSOU, S. et al. Modeling and control of hybrid photovoltaic wind power system with battery storage. **Energy Conversion and Management**, v. 89, p. 615-625, 2015.

AKBARI, H. et al. Efficient energy storage technologies for photovoltaic systems. **Solar Energy**, 2018

AKINYELE, D. O.; RAYUDU, R. K. Review of energy storage technologies for sustainable power networks. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 8, p. 74-91, 2014.

AMIRANTE, R. et al. Overview on recent developments in energy storage: Mechanical, electrochemical and hydrogen technologies. **Energy Conversion and Management**, v. 132, p. 372-387, 2017.

ANEKE, M.; WANG, M.. Energy storage technologies and real life applications—A state of the art review. **Applied Energy**, v. 179, p. 350-377, 2016.

ARES. **The Power of Gravity** [Online]. 2019. Disponível em: <<https://www.aresnorthamerica.com/>>.

AZHGALIYEVA, D. Energy Storage and Renewable Energy Deployment: Empirical Evidence from OECD countries. **Energy Procedia**, v. 158, p. 3647-3651, 2019.

BALCOMBE, P.; RIGBY, D.; AZAPAGIC, A. Investigating the importance of motivations and barriers related to microgeneration uptake in the UK. **Applied Energy**, v. 130, p. 403-418, 2014.

BERRADA, A.; LOUDIYI, K.; ZORKANI, I. Profitability, risk, and financial modeling of energy storage in residential and large scale applications. **Energy**, v. 119, p. 94-109, 2017.

BLAIR, C. **Gravitricity – Storing Power as well as Energy** [Online].2016. Disponível em: <<http://www.all-energy.co.uk/Conference/Download-2016-Presentations/>>.

BOTHA, C. D.; KAMPER, M. J. Capability study of dry gravity energy storage. **Journal of Energy Storage**, v. 23, p. 159-174, 2019.

CASTILLO, A.; GAYME, D. F. Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration: A survey. **Energy Conversion and Management**, v. 87, p. 885-894, 2014.

CAZZANIGA, R. et al. DOGES: Deep ocean gravitational energy storage. **Journal of Energy Storage**, v. 14, p. 264-270, 2017.

CHUANSHENG, H. **Constant pressure energy storage hydraulic pump**. U.S. Patent Application No 101644243, 2010.

DAYA, A. A. **Gravity energy storage and generating device**. U.S. Patent Application No 12924961, 2012.

DOSTÁL, Z.; LADÁNYI, L. Demands on energy storage for renewable power sources. **Journal of Energy Storage**, v. 18, p. 250-255, 2018.

FRANKLIN, M.; FRAENKEL, P. **Apparatus and method for electrical energy storage based on the potential energy of a vertically moving massive weight**. U.S. Patent Application No 134620, 2018.

GRAVITRICITY [Online]. 2019. Disponível em: <<https://www.gravitricity.com/>>.

GRAVITY POWER. **Grid Scale Energy Storage**, [Online]. 2017. Disponível em: <<http://www.gravitypower.net/>>.

GRZESIAK, W. Innovative system for energy collection and management integrated within a photovoltaic module. **Solar Energy**, v. 132, p. 442-452, 2016.

HAWKES, A. D. Estimating marginal CO2 emissions rates for national electricity systems. **Energy Policy**, v. 38, n. 10, p. 5977-5987, 2010.

JING, F. **Self-generating railway road lamp for generating power by using gravity potential energy and suction force**. U.S. Patent Application No 103868007, 2014.

JU, X. et al. A review on the development of photovoltaic/concentrated solar power (PV-CSP) hybrid systems. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 161, p. 305-327, 2017.

KOUSKSOU, T. et al. Energy storage: Applications and challenges. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 120, p. 59-80, 2014.

LETCHER, T. M.; LAW, R.; REAY, D. **Storing energy**: with special reference to renewable energy sources. Oxford: Elsevier, 2016.

LOUDIYI, K.; BERRADA, A. Experimental Validation of Gravity Energy Storage Hydraulic Modeling. **Energy Procedia**, v. 134, p. 845-854, 2017.

MASON, I. G. Comparative impacts of wind and photovoltaic generation on energy storage for small islanded electricity systems. **Renewable Energy**, v. 80, p. 793-805, 2015.

MCKENNA, E. et al. Economic and environmental impact of lead-acid batteries in grid-connected domestic PV systems. **Applied energy**, v. 104, p. 239-249, 2013.

MCMANUS, M. C. Environmental consequences of the use of batteries in low carbon systems: The impact of battery production. **Applied Energy**, v. 93, p. 288-295, 2012.

MENÉNDEZ, J. et al. Energy from closed mines: Underground energy storage and geothermal applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 108, p. 498-512, 2019.

MGH. **Deep Sea Energy Storage** [Online]. 2015. Disponível em: < <http://www.mgh-energy.com/>>.

MOHAMMEDI, A. et al. Comparative assessment for the feasibility of storage bank in small scale power photovoltaic pumping system for building application. **Energy Conversion and Management**, v. 172, p. 579-587, 2018.

MORSTYN, T.; CHILCOTT, M.; MCCULLOCH, M. D. Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts. **Applied Energy**, v. 239, p. 201-206, 2019.

ONDECK, A. D.; EDGAR, T. F.; BALDEA, M. Impact of rooftop photovoltaics and centralized energy storage on the design and operation of a residential CHP system. **Applied Energy**, v. 222, p. 280-299, 2018.

PARASTEGARI, M. et al. Joint operation of wind farm, photovoltaic, pump-storage and energy storage devices in energy and reserve markets. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 64, p. 275-284, 2015.

PAUL, L. **Method for generation of energy from of mobile masses**. U.S. Patent Application No 4417925, 1995.

PUJADES, E. et al. Underground pumped storage hydroelectricity using abandoned works (deep mines or open pits) and the impact on groundwater flow. **Hydrogeology Journal**, v. 24, n. 6, p. 1531-1546, 2016.

REDDY, S.S. Optimal scheduling of thermal-wind-solar power system with storage. **Renewable Energy**, v. 101, p. 1357-1368, 2017.

REHMAN, S. et al. Pumped hydro energy storage system: A technological review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 586-598, 2015.

REN, G. et al. Overview of wind power intermittency: Impacts, measurements, and mitigation solutions. **Applied Energy**, v. 204, p. 47-65, 2017.

ROHIT, A. K.; RANGNEKAR, S. An overview of energy storage and its importance in Indian renewable energy sector: Part II–energy storage applications, benefits and market potential. **Journal of Energy Storage**, v. 13, p. 447-456, 2017.

SANDRU, O. **Gravel energy storage system funded by Bill Gates, The Green Optimistic**. 2012. Disponível em: <[www.greenoptimistic.com](http://www.greenoptimistic.com)>.

SINGH, S.; SINGH, M.; KAUSHIK, S. C. Feasibility study of an islanded microgrid in rural area consisting of PV, wind, biomass and battery energy storage system. **Energy Conversion and Management**, v. 128, p. 178-190, 2016.

SLOCUM, A. H. et al. Ocean renewable energy storage (ORES) system: Analysis of an undersea energy storage concept. **Proceedings of the IEEE**, v. 101, n. 4, p. 906-924, 2013.

SUBERU, M. Y.; MUSTAFA, M. W.; BASHIR, N. Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 35, p. 499-514, 2014.

WINDE, F.; KAISER, F.; ERASMUS, E. Exploring the use of deep level gold mines in South Africa for underground pumped hydroelectric energy storage schemes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 668-682, 2017.

ZAOUCHE, F. et al. Supervision and control strategy for photovoltaic generators with battery storage. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 30, p. 19536-19555, 2017.  
HUGHEY, C. E. **Hybrid vertical energy storage system**, U.S. Patent Application No 13136176, 2012.