

ENERGIA EÓLICA AEROTRANSPORTADA: UMA REVISÃO DA TECNOLOGIA

A REVIEW OF TECHNOLOGY AIRBORNE WIND ENERGY

ANNY KEY DE SOUZA MENDONÇA, Dra. | UFSC

ANTONIO CEZAR BORNIA, Dr. | UFSC

RESUMO

Energia Eólica Aerotransportada ou Airborne Wind Energy (AWE) é uma tecnologia inovadora de energia renovável que utiliza dispositivos de energia eólica em vez de turbinas eólicas convencionais que aproveitam a energia cinética do vento que sopram em altitudes elevadas acima do solo e são capazes de se manter no ar através de forças aerostáticas ou aerodinâmicas. Com o objetivo de tornar a energia eólica mais barata e viável em um número maior de localidades, esta tecnologia vem sendo alvo de um número crescente de pesquisas nos últimos anos. Este artigo fornece uma revisão das diferentes tecnologias que estão sendo investigadas como uma alternativa para a exploração do fluxo de energia eólica em alta altitude, com ênfase especialmente nos aspectos relacionados aos protótipos desenvolvidos por universidades e empresas, destacando os resultados alcançados.

PALAVRAS CHAVE: Energia eólica; Energia eólica aerotransportada; Protótipos; Patentes

ABSTRACT

Airborne Wind Energy is an innovative renewable energy technology that uses wind power devices instead of conventional wind turbines that take advantage of kinetic energy from the wind blowing at high altitudes above ground and are able to stay in the air through aerostatic forces or aerodynamic. With the goal of making wind energy cheaper and viable in a larger number of locations, this technology has been the target of a growing number of surveys in recent years. This article provides a review of the different technologies that are being investigated as an alternative to the exploration of the wind energy flow in high altitudes, with emphasis in the aspects related to the prototypes developed by universities and companies, highlighting the results achieved.

KEY WORDS: Wind energy; Airborne wind energy; Prototypes; Patents



1. INTRODUÇÃO

A energia na sociedade é explicada em face da constante expansão da economia mundial e do crescimento populacional. A energia é uma das entradas fundamentais para o desenvolvimento econômico de um país e o bem estar humano. As fontes de energia evoluíram ao longo do tempo, e para atender a grande demanda, fontes fósseis são amplamente utilizadas.

A energia através da força da água, do vento, da energia do sol, do carvão, petróleo, gás natural entre outros são utilizadas atualmente para geração de energia elétrica (IEA, 2015). Recentemente um grande esforço vem se fazendo para reduzir o uso de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural, como forma de evitar o aumento do aquecimento global e seu impacto nas mudanças climáticas (IPCC, 2014; IEA, 2015). Por esta razão, a geração de energia através de fontes alternativas vem ganhando cada vez mais espaço no mundo inteiro, ocupando progressivamente uma fatia maior na matriz energética. Entre elas está a energia eólica, cujo potencial global estimado excede a produção mundial de energia elétrica do ano de 2012 (IPCC, 2012).

Segundo Archer e Jacobson (2005); Archer e Caldeira (2009), a energia eólica global tem potencial para atender a demanda de energia do mundo, e estudos indicam que, em camadas mais elevadas da atmosfera, quase todas as localidades no mundo apresentam potencial energético significativo.

Em 2017 a capacidade global de energia eólica instalada alcançou 539.581 MW, representando um crescimento de mercado de mais de 10,5%, com forte crescimento para a indústria de transformação (GWEC, 2018).

No início de 2018, o número de países com mais de 1.000 MW de capacidade instalada eram 27, sendo 15 na Europa; 5 na Ásia e Oceania (China, Índia, Japão, Coreia do Sul e Austrália); 3 na América do Norte (EUA, Canadá e México) e 3 na América Latina (Brasil, Chile e Uruguai). Deste total, somente nove países tinham mais de 10.000 MW da capacidade instalada, incluindo China (188.232 MW), EUA (89.077 MW), Alemanha (56.132 MW), Índia (32.848 MW), Espanha (23.170 MW), Reino Unido (18.873 MW), França (13.759), Brasil (12.763) e Canadá (12.239) (GWEC, 2018).

O Brasil, que possui uma matriz energética que conta com a participação de 70% de fontes renováveis, sendo 62% atribuída à fonte hidrelétrica, vem passando por uma escassez de energia devido à falta de água nas usinas hidrelétricas (ANEEL, 2018). Alterações climáticas importantes tem causado diminuição no nível de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas e, em situações extremas, termelétricas são acionadas para suprir a demanda de

eletricidade. Para não perder sua posição de destaque no cenário mundial, em relação ao uso de fontes renováveis, políticas de incentivo tem ocasionado um rápido aumento da indústria de energia eólica.

A energia eólica no Brasil está se expandindo rapidamente, nos últimos 8 anos, e é a fonte de energia que mais cresce nas participações dos leilões de energia, contribuindo com cerca de 8,04% de toda a capacidade de energia elétrica do país. Hoje o Brasil possui 521 parques eólicos instalados com 12.798 MW de potência outorgada, 116 parques eólicos em construção com 2.611 MW de potência e outros 91 parques eólicos com 1.977 MW de potência cujas construções ainda não iniciaram (ANEEL, 2018).

No entanto, as localidades com ventos adequados na altura das torres para a instalação de novos parques eólicos num cenário mundial, são limitadas. Para contornar essa limitação, torres eólicas cada vez mais altas tem sido construídas (IEA, 2013), conseguindo assim, explorar ventos mais fortes e frequentes nas camadas mais altas da atmosfera. Infelizmente, estudos apontam que esse aumento das torres deve torná-las economicamente inviáveis, devido ao alto custo de material, transporte e montagem que essas grandes torres e suas hélices acarretam (FAGIANO, 2009).

Nesse contexto, a tecnologia inovadora de exploração de energia renovável denominada *Airborne Wind Energy* têm sido estudada. Esta tecnologia utiliza dispositivos aéreos que aproveitam a energia cinética do vento em altas altitudes e são capazes de se manter no ar através de forças aerodinâmicas ou aerostáticas, vem sendo pesquisada como uma alternativa para contornar essas dificuldades.

Essa nova tecnologia, encontra-se atualmente em fase de pesquisa e desenvolvimento (P&D) em universidades e empresas como uma alternativa viável para a maior exploração do potencial eólico em alta altitude e deve atingir o mercado num futuro próximo (ZILLMANN e HACH, 2014). Vários grupos de pesquisas universidades/empresas, estão trabalhando em aspectos tecnológicos diferentes, incluindo controle de pouso e decolagem, eletrônica embarcada e projetos mecânicos.

Este artigo fornece uma visão geral dos conceitos da tecnologia AWE, as diferentes configurações do sistema, os protótipos desenvolvidos por universidades e empresas e as patentes aplicadas.

2. MÉTODO

Esta pesquisa fez uso de dados de patentes obtidos do banco de dados da *Derwent Innovations Index da Web of Science - WoS*. A *Derwent Innovations Index* é

uma ferramenta de pesquisa de patentes que combina o *Derwent World Patents Index* com o *Derwent Patents Citation Index* para classificar patentes de acordo com a área de tecnologia. Este estudo realizou uma pesquisa por palavras-chave, conforme mostra a Tabela 01, para os termos que aparecem em TS = Tópico, não estabelecendo tempo, portanto, a análise abrangeu o período disponibilizado pelo Portal de Periódicos da Capes que abrange o período entre 1963 e o presente dia.

Palavras-chave de pesquisa de patentes	Expressão
	TS=(<i>"Airborne Wind Energy OR "Airborne Wind Power" OR "High Altitude Wind Energy" OR "High Altitude Wind Power" OR "Kite wind generator" OR "kitewindenergy" OR "Crosswindkite" OR "Airborne Wind Turbine" OR "FlyingElectricGenerator" OR "Kite power" OR "Kite energy" OR "Pumping kite" OR "Kitemodel" OR "Kite-Based Wind Energy" OR "kite wind power" OR "Kite-Powered System" OR "Kitetowedship" OR "crosswindtowing" OR "flyingkite"</i>)
Nº de patentes	298

Tabela 01 – Resultados da pesquisa de patentes nos bancos de dados do Derwent Innovations Index.
Fonte: Autores.

Com essa estratégia de pesquisa foram encontrados 298 patentes que estavam alinhados com o tema e eram favoráveis para a análise. A análise foi facilitada pelo uso do *software Network Analysis Interface for Literature Review (NAIS)* que utiliza funções estatísticas e de análise de rede, oferecendo uma visão geral dos conjuntos de dados de patentes recuperados da *Derwent da Web of Science*.

3. ENERGIA EÓLICA AEROTRANSPORTADA

O campo de pesquisa com *Airborne wind energy* tem atraído muito interesse nos últimos anos (CHERUBINI et al. 2015), estimulado principalmente pela redução drástica de materiais e por extrair energia de ventos de alta velocidade em altitudes maiores que as turbinas convencionais, podendo assim, aproveitar ventos mais fortes e estáveis (AHRENS et al., 2014a).

De um modo geral, a velocidade do vento aumenta à medida que a altitude de operação aumenta (ARCHER e JACOBSON, 2005; ARCHER e CALDEIRA, 2009). Os dispositivos AWE operam em altas altitudes, sendo inalcançáveis por turbinas eólicas convencionais de eixo horizontal (CHERUBINI et al. 2015; FAGIANO e MILANESE, 2012). Estes dispositivos, têm mais graus de liberdade que as turbinas eólicas convencionais, graças ao fato de estarem presas ao solo por meio de cabos flexíveis, em vez de torres rígidas (FAGIANO, 2009).

Vários estudos propõem geração de energia eólica por meio de dispositivos aéreos e nos últimos anos diversos protótipos de sistemas inovadores para aproveitar o fluxo de vento em altas altitudes foram construídos e patenteados.

De acordo com Milanese et al. (2006) o conceito de geração de energia em alta altitude, refere-se ao uso de aerofólios para extrair energia do vento em altas altitudes. Os aerofólios em voo (genericamente designado pelo termo "pipas") são acionado por uma unidade de controle automático, capaz de controlar diferentemente os cabos para influenciar o movimento da asa e otimizar a conversão de energia eólica em energia elétrica ou mecânica.

Esta tecnologia apesar de ser intensivamente estudada, ainda não possui produtos comerciais disponíveis, no entanto, pesquisas e investimentos significativos estão sendo feitos. Um panorama sobre o estado da arte da tecnologia AWE foi publicado por (AHRENS et al., 2014a; CHERUBINI et al., 2015). Mendonça et al. (2017) fez uma comparação da literatura científica com as patentes desenvolvidas para obter maiores informações sobre o estado da arte da tecnologia AWE. Schmehl (2015a) desenvolveu um mapa, apresentando as 62 instituições de pesquisas envolvidas em P&D nesta área.

Esta tecnologia tem apresentado um número crescente de protótipo que num futuro próximo se aproxima da fase de desenvolvimento de mercado (ZILLMANN e HACH, 2014). No entanto, de acordo com Lellis et al. (2016) ainda não há um consenso entre à comunidade científica e a indústria de qual das abordagens para geração de energia é mais promissora em termos de eficiência, viabilidade econômica e tecnológica, escalabilidade e confiabilidade.

3.1. Conceitos básicos

A ideia da tecnologia de energia eólica com aerofólios cabeados é gerar energia elétrica explorando ventos em altitudes elevadas com estruturas simples, leves e com baixo custo, de forma a ser competitiva com a tecnologia convencional baseada em torres suportando turbinas de eixo horizontal.

De acordo com Fagiano et al. (2010a), nas torres eólicas convencionais, 20% da superfície na ponta da hélice contribuem com 80% da potência elétrica gerada. Isso ocorre porque a velocidade tangencial da ponta da hélice é maior e conseqüentemente a velocidade efetiva do vento é maior na parte externa da hélice. Esta é uma informação importante, dado que a energia extraída cresce com o cubo da velocidade efetiva do vento. Portanto, a torre e a estrutura interna das hélices não contribuem significativamente para a geração de energia, servindo basicamente para manter a ponta da hélice suspensa no ar e girando com velocidade.

Para superar as principais dificuldades que surgem com o aumento de tamanho e massa de uma torre eólica convencional, o paradigma da energia eólica com dispositivos cabeados se propõe a eliminar os elementos estruturais que não estão diretamente envolvidos na geração de energia (ZANON et al., 2014).

Desta forma, para entender o conceito de energia eólica com aerofólios cabeados, pode-se imaginar remover toda a estrutura volumosa de uma torre de um aerogerador eólico convencional mantendo apenas a extremidade das hélices, a qual se deslocaria no ar como se fosse um aerofólio cabeado que voa rapidamente na presença do vento (FAGIANO et al., 2010a).

A ideia é substituir as torres das turbinas eólicas por cabos, e as hélices por aerofólios cabeados como uma pipa ou uma asa de avião. Pode-se ainda substituir as hélices por um balão, cujo papel é sustentar um gerador embarcado. O aerofólio é conectado ao solo por um ou mais cabos cujo papel é transferir a energia para o solo, seja mecânica, quando o gerador está no solo, ou elétrica, quando o gerador está embarcado. Os aerofólios conseguem extrair energia do vento em altitudes elevadas onde o vento é mais forte e mais frequente, e isto é inacessível para as turbinas eólicas convencionais. A Figura 01 apresenta o conceito básico da tecnologia AWE.

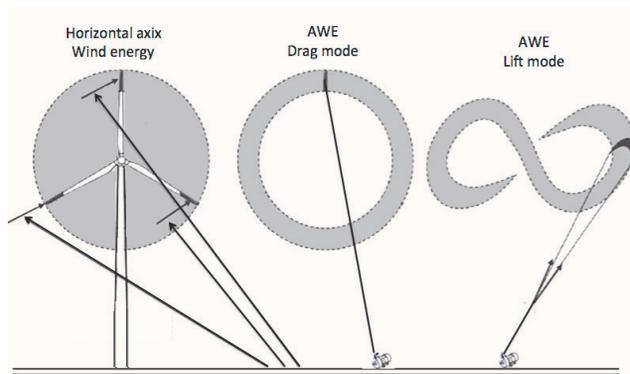


Figura 01 – Conceito básico da tecnologia AWE
Fonte: (FAGIANO et al., 2010b), p169.

O conceito da tecnologia AWE foi introduzido na década de 80 por Loyd (1980) com a pesquisa intitulada *Crosswind kite power*. Nela, Loyd descreveu dois modos de gerar energia elétrica por meio da tecnologia AWE: o **lift mode** com geradores posicionados no solo em modo de sustentação, e o **drag mode** com geradores suspensos em modo de arrasto. Loyd (1980) é considerado por autores como (DIEHL, 2001; OCKELS, 2001; CANALE et al., 2006) como o precursor das pesquisas envolvendo a tecnologia AWE. Porém, foi somente a partir de 2007 que a tecnologia AWE teve um novo impulso com as

pesquisas desenvolvida por (ROBERTS et al., 2007; CANALE et al., 2007a; ILZHOER et al., 2007; CANALE et al., 2007b; WILLIAMS et al., 2008; ARGATOV et al., 2009; ARGATOV e SILVENNOINEN, 2010; CANALE et al., 2010; FAGIANO et al., 2010b).

De acordo com Loyd (1980); Cherubini et al. (2015) os sistemas AWEs podem ser classificados como:

- 1) sistema com gerador em solo - (modo de sustentação), neste sistema a energia elétrica é produzida no solo por meio de trabalho mecânico feito pela força de tração, transmitida do aerofólio para o gerador em terra através de um ou mais cabos, que produzem um movimento rotacional que faz o gerador trabalhar. Esta classificação, pode ser diferenciada entre dispositivos de estação fixa ou móvel no solo.
- 2) sistema com gerador suspenso - (modo de arrasto), neste sistema a energia elétrica é produzida no aerofólio e é transmitida ao solo através de um cabo especial com dupla finalidade: manter o aerofólio em altura controlada e acomodar cabos elétricos que transmitem a energia. Os sistemas com geradores suspensos produzem energia elétrica continuamente durante a operação, exceto durante as manobras de decolagem e pouso, em que energia é consumida.

4. CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA

Com intenção de gerar energia limpa e a um baixo custo de geração, instituições de pesquisas e empresas envolvidas em P&D com a tecnologia AWE vêm investigando várias alternativas. Em geral, as diferentes soluções encontradas podem ser classificadas de várias formas, por exemplo, pelo tipo do aerofólio, número de cabos de força e de comando do aerofólio e a localização do gerador (no aerofólio ou no solo). Pode-se também classificar as diferentes soluções através de como as componentes 'força de sustentação' e 'força de arrasto', provocadas pelo vento aparente no aerofólio, são exploradas na geração de energia. A Figura 02 ilustra algumas soluções baseadas no Modo de Sustentação (lift mode) e no Modo de Arrasto (drag mode).

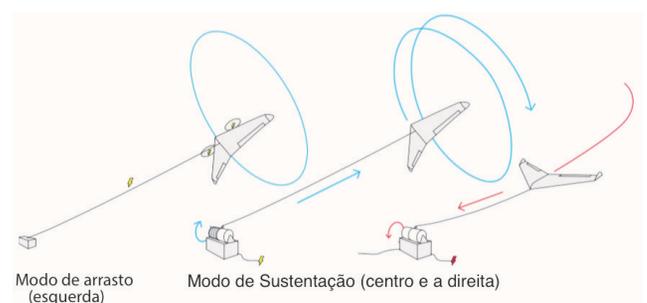


Figura 02 – Possíveis configuração do sistema AWE.
Fonte: (SCHMEHL, 2018), p 3.

4.1. Modo de Sustentação

Na configuração em modo de sustentação, um aerofólio é preso através de um cabo de comprimento variável a um sistema eletro-mecânico no solo (fixo ou móvel) responsável por gerar energia elétrica. Para maximizar a tração no cabo, e conseqüentemente a potência extraída do vento, o aerofólio é controlado para executar manobras num plano aproximadamente perpendicular à direção do vento, o que caracteriza as chamadas manobras de vento cruzado. A força de tração no cabo depende da velocidade do vento e da velocidade com que o aerofólio cruza o fluxo de vento. Várias estruturas usando aerofólios cabeados têm sido propostas na literatura, algumas delas discutidas por (AHMED et al., 2012; CHERUBINI et al., 2015). No modo de sustentação, entre as diversas formas de estrutura mecânica, associadas às diferentes formas de conversão da força do cabo em torque no eixo do gerador, pode-se mencionar três abordagens principais: a configuração *Pumping Kite*, a configuração com Múltiplos-Aerofólios e a configuração em Carrossel.

4.1.1. Configuração *Pumping Kite*

A configuração mais estudada na geração de energia através de aerofólios cabeados é a configuração *Pumping Kite*. Nessa configuração o aerofólio é conectado ao solo através de um cabo de comprimento variável, enrolado num tambor, cujo eixo é conectado ao gerador. Com o afastamento do aerofólio pelo vento o cabo é desenrolado, provocando o giro do tambor e do gerador, gerando assim energia. Além disso, de modo a evitar o acúmulo de torção no cabo, uma trajetória do tipo "oito deitado"(∞) é utilizada. Note que, uma trajetória circular também poderia ser utilizada, se for usada um destorcedor de cabo. O aerofólio percorre essa trajetória com velocidade muito maior que a do vento, o que permite aumentar de forma marcante a eficiência no aproveitamento da energia dos ventos.

Ao se atingir o comprimento máximo do cabo a geração de energia é interrompida, reconfigura-se o aerofólio para reduzir ao máximo a tração no cabo e o aerofólio é recolhido gastando-se uma pequena parte da energia gerada. Assim que o aerofólio é trazido ao ponto de partida (comprimento inicial do cabo), o aerofólio é novamente reconfigurado para aumentar a tração no cabo e a fase de geração é reiniciada. A energia produzida na fase de geração menos a energia gasta na fase de recolhimento é a energia que efetivamente o sistema *Pumping Kite* consegue fornecer. Este ciclo de tração e recolhimento do aerofólio é conhecido como operação *pumping kite*. A Figura 03 apresenta um sistema operando no modo de sustentação na configuração *pumping kite*.

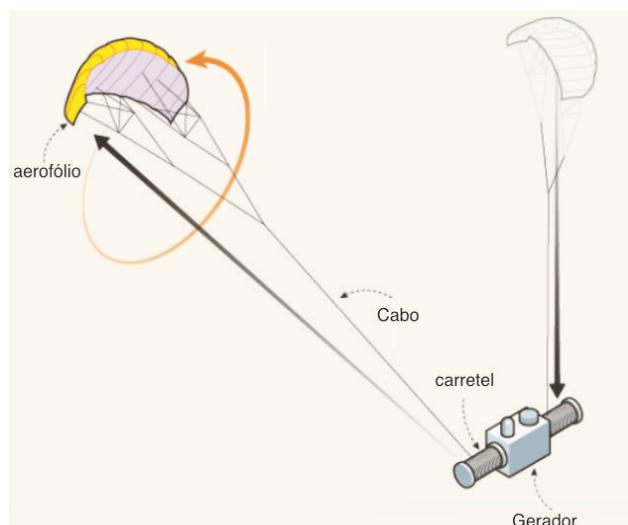


Figura 03 – Princípio de funcionamento do sistema *pumping kite*.
Fonte: (AHRENS et al., 2014a), p 404.

O interesse pelo sistema *Pumping Kite* deve-se provavelmente ao seu conceito simples, com uma estrutura eletromecânica de geração simples, contando com apenas o aerofólio para movimentar a estrutura. Além disso, o custo de um sistema *Pumping Kite* é atrativo (DE LELLIS et al., 2016) quando comparado com outras configurações, como carrossel ou múltiplos aerofólios discutidos a seguir. Isto torna mais fácil e menos onerosa a construção de protótipos de pesquisa dessa tecnologia.

A Figura 04 mostra uma estrutura com uma unidade de geração conectada a dois tambores por meio de embreagens operando em modo *pumping kite*. Enquanto um aerofólio está na fase de geração, o outro está na fase de recolhimento, podendo assim gerar energia continuamente (WEBSTER, 2018).

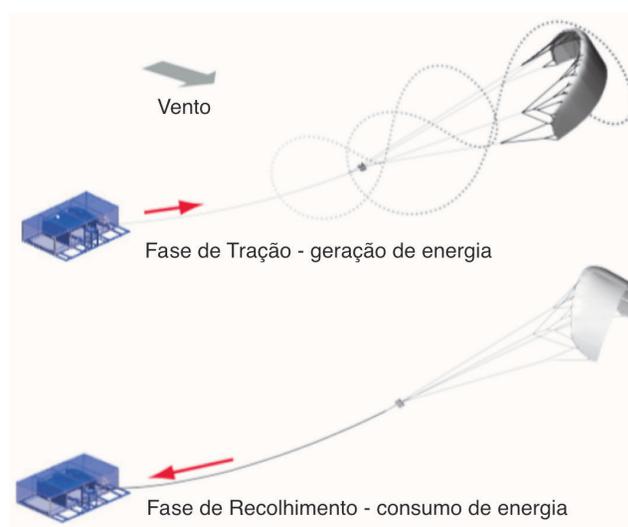


Figura 04 - Conceito de *Pumping kite* com dois aerofólios em modo complementar para geração contínua de energia.
Fonte: (Webster, 2018).

As principais variantes dessa configuração estão relacionadas ao tipo de aerofólio utilizado. Eles podem variar por exemplo, no número de aerofólios (simples ou múltiplos), número de cabos que chegam ao solo, à sua rigidez (rígido ou flexível), e a localização dos geradores nesse caso é sempre no solo. A configuração *Pumping Kite* também pode ser implementada com o uso de Múltiplos Aerofólios fixados no mesmo cabo de conexão com a unidade de geração no solo. A Figura 05 apresenta esta configuração.



Figura 05 - Conceito de aerofólio cabeada com configuração em anel empilhado.
Fonte: (READ, 2018a) p. 517.

A ideia é similar à de uma turbina com várias hélices. Esta abordagem, apesar de interessante, possui algumas dificuldades relacionadas ao controle de trajetória conjunta dos aerofólios, pois evitar a possibilidade de choque entre os aerofólios e as manobras de decolagem e pouso se tornam tarefas mais complexas. Mais informações sobre arranjos com múltiplos aerofólios podem ser encontrados em (HOUSKA e DIEHL, 2007), assim como em (SEQUOIA, 2014; READ, 2018b). A ideia de usar aerofólios para gerar energia em várias configurações é coberta por um número grande de patentes (MENDONÇA et al., 2017).

4.1.2. Configuração em Carrossel

Na configuração em carrossel, vários aerofólios são fixados sobre os braços de um sistema mecânico de rotação acoplado a um gerador com rotor de eixo vertical, como mostra a Figura 06.

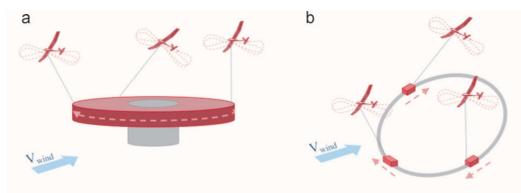


Figura 06 - Modo de sustentação com sistema móvel - configuração carrossel.
Fonte: (CHERUBINI et al., 2015) p.1463.

Nesta configuração, a geração de energia ocorre com o movimento rotativo do carrossel e necessita de um sistema de controle coordenado e sincronizado que evite colisões entre os aerofólios, assim como na estrutura baseada com vários aerofólios. A configuração em carrossel é coberta pelas patentes (AHRENS, 2006, 2007; IPPOLITO e TADDEI, 2007; IPPOLITO, 2012; WOO e WOO, 2014) e desenvolvida pela empresa italiana *Kite Gen Research* (KITEGEN, 2016) e pela empresa alemã NTS (NTS, 2014).

4.2. Modo de Arrasto

A configuração em modo de arrasto consiste em um aerofólio cabeado com um ou mais geradores embarcados, ligado ao solo por um cabo especial que, além de manter o aerofólio em trajetória desejada, possui cabos elétricos embutidos responsáveis pela transmissão da energia gerada para o solo, como apresentada na Figura 07.

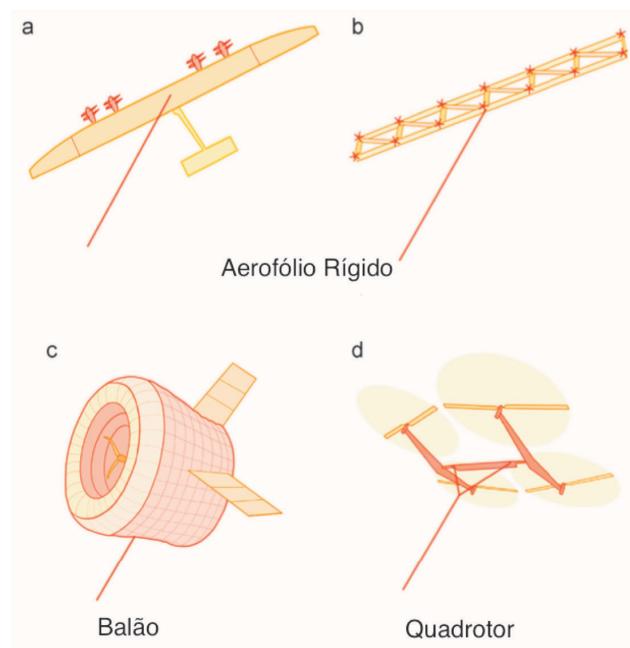


Figura 07 - Sistemas AWE com geradores embarcados.
Fonte: Adaptado de (Cherubini et al., 2015), p1470.

O aerofólio é mantido suspenso no ar pela força de sustentação enquanto a energia é gerada pela força de arrasto, como no caso das turbinas eólicas convencionais, onde o aerogerador é mantido suspenso pelo uso de uma torre e a geração de energia ocorre pela força de empuxo na turbina.

Os aerofólios usados na exploração do modo de arrasto para gerar energia podem ser uma asa, que em geral são rígidas para poder sustentar o gerador embarcado. As unidades de geração apresentadas na Figura 07 mostram diferentes soluções. No item a, o aerofólio consiste de uma asa rígida com quatro turbinas, protótipo da

empresa *Makani Power Inc*, enquanto no item b, duas asas rígidas e turbinas são utilizadas, projeto da *Joby Energy, Inc*. No item c, um balão inflado com hélio é utilizado para manter o gerador suspenso numa certa altura com turbina eólica no centro, projetada pela *Altaeros Energies Inc*. Já no item d, um sistema similar a um quadrotor é utilizado num modo de operação diferente dos anteriores conhecido como modo de empuxo do rotor.

5. PROTÓTIPOS EM DESENVOLVIMENTO

Vários projetos com a tecnologia AWE estão sendo pesquisados e desenvolvidos, mas até este momento nenhum projeto operacional foi apresentado ao mercado. No entanto, de acordo com Diehl (2018), o desenvolvimento tecnológico da energia eólica em alta altitude esta bem avançada, e muitas pessoas trabalham com sucesso em tópicos que variam desde a modelagem e otimização de sistemas até as questões práticas relacionadas ao design e implementação no mundo real e suas implicações econômicas.

A seguir serão apresentados protótipos desta tecnologia em modo de sustentação e arrasto desenvolvidos por empresas e universidades.

5.1. Protótipos em Modo de Sustentação

O grupo de pesquisa *Kite Power Systems Ltd* da Universidade Tecnologia de Delft (TU Delft) seguiu com os trabalhos desenvolvido pelo astronauta holandês e professor universitário Wubbo Johannes Ockels que patenteou em 1997, o *Laddermill*. A equipe trabalha com aerofólios cabeados com quatro cabos (VLUGT et al., 2014) e uma unidade de controle embarcada apresentada na Figura 8, item a. Dois cabos no bordo de fuga do aerofólio são conectados à unidade de controle embarcada e são utilizados para o controle de voo. Os outros dois cabos, conectados ao bordo de ataque do aerofólio, se juntam a um cabo principal na altura da unidade de controle. Este cabo principal (cabo de tração) liga o aerofólio ao solo e transmite a força de tração extraída do vento para a unidade de geração no solo. Esta equipe de pesquisa tem aplicado várias patentes, na qual o primeiro aspecto diz respeito a pipa, compreendendo a asa, um controlador que pode ser configurado para gerar sinais de controle para controlar a disposição do atuador que pode mudar as orientações no bordo de ataque e no bordo de fuga do aerofólio (HORNZEE-JONES e HAMPTON, 2014a). Dentre este e outros inventos, desenvolveram também um guincho com um tambor rotativo em torno de seu eixo que é um guia para controlar o enrolar e o desenrolar do cabo em torno do tambor (HORNZEE-JONES e HAMPTON, 2014b).

A empresa italiana *Kite Gen Research Srl* surgiu a partir de pesquisas feitas na Politecnico di Torino, uma das universidades mais atuantes em pesquisa com a tecnologia AWE (MENDONÇA et al., 2017). *Kite Gen* é a empresa com maior número de aplicação em patentes. Desenvolveu um sistema *pumping kite* que usam dois cabos principais (IPPOLITO, 2006) ou até três para controlar o aerofólio com diferenças de comprimento dos cabos (CANALE et al., 2007b). De acordo com Ahrens et al. (2014a), *Kite Gen* foi uma das primeiras empresas a testar um protótipo de *airborne wind energy* em modo sustentação. A empresa também têm aplicação de patentes com um sistema eólico para converter energia compreendendo pelo menos um perfil de asa integrando eletrônica embarcada e sensores sendo controlado por dois cabos (IPPOLITO, 2006; IPPOLITO e TADDEI, 2006). Desenvolveu um processo para controlar automaticamente o voo (IPPOLITO, 2006) e um controle automático do voo (MILANESE et al., 2006). Entre estas e outras pesquisas com desenvolvimentos de patentes, têm desenvolvido uma Infra-estrutura offshore flutuante para uso de energia eólica (IPPOLITO, 2015). A empresa, tem intenção de atingir 3 MW de potência com o protótipo "*KiteGen Stem*" (KITEGEN, 2016) que pode ser visto na Figura 08, item b.



Figura 08 - Protótipos com aerofólios cabeados em modo de sustentação.
Fonte: a) KitePower (VLUGT et al., 2014), b) KiteGen (KITEGEN, 2016), c) KitEnergy (KITENERGY, 2018) d) UFSCkite (LELLIS et al., 2016) e) SKYSAILS (SKYSAILS, 2014).

Também fundada a partir de pesquisas na universidade *Politecnico di Torino*, a empresa *Kitenergy Srl* desenvolveu e está testando um protótipo com 60 KW de potência nominal (KITENERGY, 2018). A empresa tem algumas patentes aplicadas. Em Milanese e Gerlero (2010) apresentam um sistema de energia eólica aerotransportada com geração em solo empregando um único motor ou motor/gerador responsável pelo controle de enrolamento e desenrolamento dos cabos e um atuador para fornecer uma ação de controle diferencial dos cabos. Em Fagiano e Milanese (2011), apresentaram um AWES por meio do voo de perfis de asa cabeadas e conectadas ao solo por cabos de comprimento fixo, sem fases passivas, e com adaptação automática às condições de vento. O aerofólio, ilustrado na Figura 8, item c, está ligado ao solo por dois cabos encaixados em dois tambores conectados à uma unidade de geração.

O grupo de pesquisas em Aerofólios Cabeados para Energia Eólica (UFSCkite) da Universidade Federal de Santa Catarina realiza investigações teóricas e experimentais com a tecnologia AWE. Seu primeiro protótipo, utiliza um aerofólio flexível de 3 m² e foi construído para fins de teste de sensoriamento, processamento embarcado e controle de voo, sem geração de energia. Este protótipo está operacional, como ilustra a Figura 8, item d. O segundo protótipo em desenvolvimento pelo grupo de pesquisa, utiliza um aerofólio flexível de 17 m² operando em modo *Pumping Kite* com uma estação no solo que utiliza um gerador de 12 KW (LELLIS et al., 2016). Duas unidades deste protótipo foram construídas e estão sendo testadas em laboratório para posterior testes de geração em campo.

A empresa alemã *Skysails GmbH SKYSAILS* (2014) fundada em 2001, utiliza aerofólios como fonte alternativa de propulsão de navios, como apresentado na Figura 8, item e. A ideia é usar a força de tração obtida com os aerofólios para ajudar na propulsão dos navios (WRAGE e BÖHM, 2004; WRAGE e MULLER, 2004), dessa forma economizando combustível fóssil. Os aerofólios são do tipo *Foil*, também chamados de aerofólio flexível com uma estrutura de célula aerodinâmica que é inflada pelo vento. A empresa comercializou esse sistema, e conseguiu automatizar o controle de voo, lançamento e a recuperação do aerofólio (WRAGE e BRABECK, 2006). *SkySails* é uma das empresas com grande número de patentes aplicadas. Entretanto, devido à crise econômica enfrentada nos últimos anos, a *SkySails GmbH* declarou falência em março de 2016, como parte do grupo corporativo *SkySails* e foi dissolvida em de abril do mesmo ano. No entanto, uma empresa sucessora, o *SkySails Group GmbH* continuou a operar sem restrições (INSOLVENZPORTAL, 2018).

A empresa *Ampyx power B.V* desenvolveu dois protótipos de aeronaves de asa rígida com 2 MW denominados AP-3 e AP-4 e esta registrando-os com as autoridades de aviação (*the European Aviation Safety Agency - EASA*) como aeronaves. A *Ampyx Power* exportou do protótipo AP-3 parte da arquitetura do drone e do sistema de lançamento e aterrissagem para o protótipo AP-4. O sistema converte energia eólica em energia mecânica por meio da aeronave controlada por piloto automático (RUITER-KAMP, 2012B; RUITERKAMP, 2012a) criando tração em um cabo por padrões repetitivos de vento cruzado a uma altitude de 200 a 450 m (KRUIJFF, 2017a,b,c; RUITERKAMP et al., 2015). A empresa planeja nos próximos anos, otimizar o protótipo para exploração comercial.

A empresa americana *WindLift* usa veículos aéreos não tripulados cabeados para gerar eletricidade. A empresa possui três patentes aplicadas, Métodos e sistemas de aerofólio cabeado (CREIGHTON e MIZZI, 2016), Cabo (STOUGH e AULL, 2016b) e um Sistema de freio rotativo híbrido para distribuição de carga, permitindo liberdade de rotação (STOUGH e AULL, 2016a). A empresa recebeu financiamento do Exército e do Corpo de Fuzileiros Navais dos EUA.

O projeto *SwissKitePower* foi desenvolvido através da colaboração de quatro instituições de pesquisas sediada na Suíça, FHNW, EMPA, ETH e EPFL. Primeiro, um demonstrador de tecnologia *Kite Power* foi projetado e construído pela FHNW para provar a viabilidade do conceito. Com o objetivo de criar uma pipa otimizada para produção de energia, um novo projeto de pipa foi desenvolvido na *Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology - EMPA*. Este novo projeto consiste de uma nova estação terrestre com três guinchos que podem ser usados para testar de 1 até 3 cabos. A *Federal Politechnique of Zurich - ETH* trabalhou na automação do sistema com foco na geração de energia totalmente autônoma. A *École Polytechnique Fédérale de Lausanne - EPFL*, tem trabalhado no desenvolvimento de modelos dinâmicos de pipas e na otimização das trajetórias de voo. Desde 2014 o FHNW está trabalhando em colaboração com a empresa *TwingTec AG*.

A tecnologia desenvolvida pela *TwingTec AG* é uma asa rígida que combina a leveza de uma asa de *kite surf* com as propriedades aerodinâmicas e estruturais do planador. A empresa desenvolveu uma plataforma móvel composta por uma estação terrestre, os dispositivos de levantamento aerodinâmico e o sistema de controle. A estação terrestre feita com uma estrutura de alumínio leve, pode ser fixada na traseira de um caminhão facilitando o transporte para testes (LUCHSINGER et al., 2018). A *TwingTec AG* obteve permissão da BAZL (*the Swiss equivalent of the Federal Aviation Administration (FAA)*) para cinco locais diferentes de testes em diferentes

partes da Suíça, onde podem voar entre 150m e 300m acima do solo dependendo do local (LUCHSINGER et al., 2018). Em 2014 com parceria com a TU Delft, começaram a realizar testes de voo em Valkenburg, na Holanda (LUCHSINGER et al., 2018).

A empresa *EnerKite GmbH* sediada na Alemanha esta testando uma plataforma móvel de asa rígida denominado EK30, um sistema de potência de pipa de 30 kW totalmente funcional, baseado na tecnologia de asa de ram-air (GMBH, 2018a). A empresa patenteou um sistema de asas cabeadas para a conversão de fluxo de energia em energia elétrica (Bormann et al., 2012), o sistema usa uma asa rígida controlada por três cabos conectado a um gerador em solo. O gerador portátil esta montado em cima de um caminhão (GMBH, 2018a).

A empresa *Kitemill AS*, assim como a *Wind Lift*, a *TwingTec* e a *EnerKite* estão testando protótipo com asa rígida. A empresa testou aerofólio flexível mas, optou por asa rígida devido à sua durabilidade e controlabilidade (CARNEL e HARKLAUL, 2015).

O sistema de energia eólica da *e-kite* consiste de uma asa ultraleve que é conectada com um cabo a uma estação terrestre (E-KITE, 2018). A empresa e-Kite construiu uma estação terrestre de 50 kW (Schmehl, 2015b).

A empresa Alemã *NTS Energie-und Transportsysteme GmbH* fundada em 2006 por Uwe Ahrens trabalha com a tecnologia *X-Wind*. A tecnologia *X-Wind* utiliza *Kites* e geradores direcionados automaticamente em altitudes entre 100 e 500m utilizando uma linha férrea oval para puxar carrinhos rolantes continuamente. Cada carrinho é equipado com um gerador para converter sua energia cinética em eletricidade (AHRENS et al., 2014b; GMBH, 2018b).

A empresa *KPS energy* (KPS (2018) fundada em 2011 e sediada no Reino Unido esta testando um sistema com dois aerofólios cabeados que voam em alta altitude, aproximadamente (1,500m). Os aerofólios são presos por cabos a um sistema de guinchos que aciona o gerador em solo. O sistema desenvolvido pela empresa pode ser visto na Figura 04. A Tabela 02, apresenta uma lista de Empresas e ou Grupos de pesquisas com conceitos diferentes de exploração da tecnologia AWE no modo de sustentação e que podem ser subclassificados em termos de, localização dos atuadores de voo, tipo de aerofólio, posição do gerador, números de cabos e faixa de potência.

Empresas/Grupos de pesquisa	Aerofólio	Localização dos atuadores de voo	Nº de cabos	Classe de Potência
KitePower TUDelft	Flexível	Suspensão	1	KW
Kite Gen Research S.r.l.	Semi-rígido	Solo	2	KW
Kite Gen Research S.r.l. - Carousel	Semi-rígido	Solo	2	MW/GW
Ampyx Power B.V	Rígido	Suspensão	1	KW/MW

WindLift	Flexível	Solo	3	KW
SkySails Group GmbH	Flexível	Suspensão	1	KW/MW
Swiss Kite Power 1	Flexível	Suspensão	1	KW
TwingTec AG	Rígido	Suspensão	2	KW
EnerKite GmbH	Ambos	Solo	3	KW
Swiss Kite Power 2	Flexível	Solo	3	KW
Kitemill	Rígido	Suspensão	1	KW
UFSCkite com geração	Flexível	Suspensão	1	KW
e-kite	Rígido	Solo	2	KW
Kitenergy S.r.l.	Flexível	Solo	2	KW
NTS GmbH	Flexível	Solo	4	-
KPS energy	Flexível	solo	1	KW

Tabela 02 - Características dos protótipos que operam no modo de sustentação.
Fonte: Adaptado de (CHERUBINI et al., 2015), (FAGIANO e MILANESE, 2012) e (SARAIVA et al., 2014).

A Tabela 03 apresenta uma lista de patentes aplicadas pelas empresas.

5.2. Modo de arrasto

A Figura 09 apresenta os protótipos de sistemas AWE em modo de arrasto das empresas Makani Power, Joby Energy, Altaeros Energy, Sky Wind Power e Magenn Power.



Figura 9 - Protótipos em modo de arrasto.
Fonte: a) Makani power (Makani, 2014), b) Joby energy (JOBYENERGY, 2018), c) Altaeros energy (Altaeros, 2015), d) Sky windpower (SKYWindPower, 2016), e) Magenn power (Power, 2018) and f) Omnidea (Pardal and Silva, 2011).

Depositário	Número da Patente	Classificação Internacional de Patentes
Kite Power Systems Ltd	US20170313415A1; US20170320711A1; US20170297701A1; US20170313415A1; GB201803335D0; GB201703337D0	B64C31/06; B66D1/365; B64C31/06; B64C31/06
Kite Gen Research Srl	US8080889B2; US8539746B2; EP2989044B1; EP3120019A1; EP3044459A1; US20160138566A1; US8319368B2; US8100366B2; US8134249B2; US8624421B2; EP2463516A1; EP3044557B1; EP3117498B1; EP3063404B1; EP2021624B1; EP2989043B1; EP3044090B1; EP3184813A1; EP3256721A1; EP3094559A1; EP3245399A1; EP3077285A1; US20090090815A1; US20150316031A1; US20160108888A1;	B63B35/7979; G01L5/06; B64C31/06; F03D7/06; B66D1/7415; F03D5/06; F03D5/04; C 02F1/286; F 02M31/20; B 63B35/7976 ; B08B5/023; F03D5/02 F03D5/00; H02J3/14; F03D13/25;
Kitenergy S.R.L.	WO2011121557A2; US20140077495A1; EP2478215B1; JP5841124B2; JP6013445B2	F03D5/00; F03D9/002
Skysails GmbH	US7504741B2; WO2005100150A 1; US20080115716A1; US20070 261624A1; DE202006018499U1; US20110139053A1; EP2844552B1; US20110052391A1; EP2844553A1; DE102015111224A1 ; US7287481B1; WO2005100147A1; US20070250226A1; WO2005100148A1; US8215588B2; DE202011102743U1; US7971545B2; US7866271B2; US8056490B2; US8117977B2; US8740153B2; US8607722B2;	F03D5/00; B64C31/06; B63H9/0685; B63B59/00; 63B35/7979; F03D5/00; G07F17/24; B63B35/7976; F03D7/02
Ampyx Power BV	WO2018072890A1; WO2013127499A1; US20150266574A1; EP2868917A1	F03D5/00; B64C39/022; B64C31/06
Windlift LLC	US20100232988A1; WO2018071430A1; WO2018075296A1; US20100232988A1	F03D5/00; B64F3/00
Twingtec AG	US20170248125A1; EP3041738B1; EP2817212A1	F03D9/32; F03D5/00; B63H9/0607
Enerkite GmbH	US20150225080A1; US20170138346A1; US20160201768A1; WO2014040716A1	B64C39/022; F03D5/00; 03D5/06
Kitemill As	WO2015150470A1; WO2017029231A1	A63H27/04; F03D5/00
E-Kite Holding BV	WO2016085337A1; WO2013147600A2; NL2013876B1	F03D5/00; F03D9/002
NTS energie- und Transportsysteme GmbH	US20090285681A1; US8505293B2; WO2012143058A1	F03D5/00; F03D5/04; B63B35/7979

Tabela 03 - Lista de patentes aplicadas pelas empresas em modo de sustentação.
Fonte: Autores.

O protótipo da empresa *Makani Power Inc* (2014), adquirida pela *Google X*, consiste de um aerofólio rígido similar à asa de um avião, com 8 metros de largura e 3 metros de profundidade projetada para operar entre 40 e 110 metros de altura. Este protótipo tem um sistema de turbinas fixadas no bordo de ataque do aerofólio, e também pode realizar as manobras de pouso e decolagem. A empresa possui registro de várias patentes onde foi desenvolvido um sistema de pipa bimodal (GRIFFITH et al., 2007b), em que as manobras de decolagem e pouso do voo pode ser realizada invertendo o sentido de rotação das turbinas, colocando-as em modo de propulsão, em uma operação similar a um quadricóptero. Neste modo de voo, os rotores da *Airborne Wind Turbine* (AWT) são utilizados como motores.

Uma AWT é preso através de um cabo a um carretel conectado ao eixo de um gerador elétrico no solo. Quando o comprimento do cabo tenha sido todo desenrolado do carretel, a AWT altera o modo de voo, tornando-se um avião cabeado. Neste momento uma trajetória de voo circular é utilizada e os rotores da *Airborne Wind Turbine* são utilizados como geradores para converter a força do vento em energia elétrica (GRIFFITH et al., 2007a). Quando o cabo atinge o seu comprimento máximo a fase passiva inicia, na qual o cabo é enrolado de volta, com um gasto de energia e tempo. O cabo foi projetado para ter menos arrasto aerodinâmico (GRIFFITH et al., 2008). A potência produzida no ciclo de funcionamento que consiste destas duas fases adjacentes é referido como o ciclo de potência. Em Lind et al. (2009) foi desenvolvido um sensor para detectar a tensão do cabo e para maximizar ou reduzir o atrito em veículos aéreos de *airborne wind turbines*. Um radiador para resfriar os motores é usado em (Lind, 2014). Estas e outras patentes desenvolvida pela *Makani Power Inc* pode ser vista na Tabela 05. A empresa está prevendo um produto comercial de 600 KW para operar de 100 a 400 metros de altitude, como um seguinte passo no projeto (SCHMEHL, 2018).

O protótipo da empresa norte-americana *Altaeros Energies Inc* (2015), fundada em 2010 por ex-alunos do instituto de Tecnologia de *Massachusetts* (MIT) e *Harvard* e sediada no MIT, utiliza uma estrutura grande, inflada com hélio para levantar voo a altitudes elevadas. A estrutura pode ser formada em uma diversidade de perfis e formas aerodinâmicos que são mais leves que o ar (GLASS, 2008). Para levantar voo, usam um aerostato em forma de balão com uma turbina eólica instalada no seu interior, de modo que o vento absoluto gera elevação, permitindo manter um ângulo de altitude com a força de empuxo. O desempenho do sistema depende não apenas do controle de altitude, mas também

da capacidade do aeróstato apontar em uma direção desejável, na posição correta em relação ao vento (VERMILLION et al., 2011). Em virtude de sua grande estrutura, este protótipo apresenta dificuldades para explorar o vento cruzado.

A empresa *Sky Windpower Corporation* SKYWindPower (2016), propôs um aerofólio chamado de "*Flying Electric Generator*" que é semelhante a um quadrotor com quatro rotores idênticos montados em uma estrutura que está conectada ao solo. Este foi um dos primeiros conceitos AWES testados através de protótipos em 1986 na Universidade de Sydney (AHRENS et al., 2014a). A empresa planejava construir e voar seu Gerador elétrico voador para demonstração em altitudes até 4.600m (15,000 pés) podendo gerar até 40 MW de potência (BRYAN et al., 2007), mas não se tem notícia sobre evoluções dessa tecnologia.

O protótipo da empresa americana *Joby Energy Inc* JOBYENERGY (2018), fundada em 2008, utiliza uma estrutura multi-aerofólios que suporta uma série de turbinas embutidas. As turbinas são utilizadas para propulsão durante a decolagem e geram energia durante o voo em manobras de vento cruzado. O método de geração de energia e as manobras de decolagem e pouso são semelhantes aos do conceito desenvolvido pela *Makani Power* (MAKANI, 2014). A *Joby Energy Inc*, está desenvolvendo aerogeradores aerotransportados e já possui três patentes aplicadas como mostra a Tabela 05. Foi desenvolvido um sistema e método para geração de energia controlada ciclicamente no ar usando auto-rotação (BEVIRT et al., 2008). Rotores primários foram adaptado para usar energia elétrica para fornecer energia às turbinas que são usadas como motores para elevar o sistema do solo para o ar (BEVIRT, 2009). Os rotores primários utilizam o vento predominante para gerar velocidade de rotação e a energia elétrica gerada é retornada ao solo usando um cabo adaptado para fixar o sistema de voo ao solo (BEVIRT e PEDDIE, 2009).

A empresa *Magenn Power Inc* fundada em 2004, possui uma abordagem diferente para a extração de energia do vento quando comparada com os protótipo apresentados até agora. Para produzir energia elétrica, usa o *Magenn Air Rotor System* (MARS), um grande cilindro leve que é preenchido com hélio para o manter suspenso no ar e que gira em torno do eixo perpendicular ao vento para gerar energia elétrica (CHAUDHARI, 2015). Os tubos de alumínio montados ao redor do cilindro restringem o fluxo de ar, criando o momento necessário para colocar todo o dispositivo em movimento no ar. Quando gira em torno de seu eixo, gera energia elétrica com dois geradores aerotransportados montados nas duas extremidades do cilindro. De acordo com Perkovic et al. (2013) o sistema de rotor a ar da *Magenn* está disponível no mercado.

A empresa *Omnidea* fundada em 2003, é uma incubadora na Agência Espacial Europeia (ESA), utiliza um sistema baseado no efeito Magnus no seu projeto energia eólica de alta altitude como dispositivos de elevação conectado ao gerador baseado em terra. Consiste em um módulo aéreo conectado por um cabo ao sistema gerador-guincho no solo (PARDAL e FREIRE, 2006). A empresa desenvolveu e aplicou várias patentes sendo algumas destinadas a tecnologia AWE. Desenvolveu uma plataforma aérea que pode ser construída em grandes dimensões sem requerer uma estrutura rígida e que utiliza flutuabilidade e efeito aerodinâmico Magnus para elevação (PARDAL e SILVA, 2011).

Na Tabela 04 são resumidos os sistemas de energia eólica aerotransportados com geradores suspensos.

Empresas/ Grupos de pesquisa	Descrição do sistema	Sustentação do Aerofólio	Geração	Classe de Potência
Makani Power	Turbinas em um aerofólio cabeado	Aerodinâmica	6/8 turbinas	600K
Joby Energy	Turbinas em um aerofólio cabeado	Aerodinâmica	Várias turbinas	2 MW
Altaeros Energies	Turbinas em um sistema lighter than air balloons	Flutuante aerostática	4 turbinas	2,4 KW
Sky Windpower	Quadrirotor cabeado	Empuxo Aero-dinâmico	4 turbinas	240 KW
Magenn Power	Magenn air rotor system	Magnus Effect		100 KW
Omnidea	Magnus Effect	Flutuante aerostática		30 kW

Tabela 04 - Sistema com geração no aerofólio.

Fonte: Adaptado de (FAGIANO e MILANESE, 2012), (CHERUBINI et al., 2015).

Já na Tabela 05 apresenta-se uma lista de patentes aplicadas pelas empresas. Algumas empresas e grupos de pesquisas listados nas Tabelas 02 e 04 não divulgam a configuração de seus protótipos por considerarem informações sigilosas do projeto.

Depositário	Número da Patente	Classificação Internacional de Patentes
Makani Power Inc	US7656053B2; US20110260462A1; US20130221679A1; US20130221154A1; US7847426B1; US20160102654A1; US20120070122A1; US20120104763A1; US20100295303A1; US20090289148A1; US20090072092A1; WO2013104007A1; WO2015138289A1; US7752830B2	F03D7/00; A63H27/002; F03D5/00; F03D1/00; D07B1/145; F03D80/60; F03D9/00; B64C31/06; B64C39/022; B64D27/26 A; H01B7/025; B63H9/0685;

Altaeros Energies Inc	US20120319407A1; EP2879950A1; US20150048203A1; JP6100799B2; US20180083726A1; US20160139601A1; WO2017087515A1; WO2018075632A1;	B64B1/06; B64B1/00; G05D1/0816; F03D3/0427; B64B1/50; B64B1/66; H04J11/003
Sky Windpower Corporation	US20120298793A1; US20030006615A1; US20160010627A1; US20160032895A1; WO2010099447A1; US9287819B2	F03D1/02; F03D9/002; F03D5/00; H02P27/06
Joby Energy, Inc.	WO2010039790A2; WO2010135604A2; WO2010148373A1	F03D13/20; F03D5/06
Magenn Power Inc	US7335000B2; US7602077B2	F03D3/002
OMNIDEA Lda	US20140001308A1; WO2013006072A1; US8247912B2	F03D5/00; B64B1/02; B64C39/022

Tabela 05 - Lista de patentes aplicadas pelas empresas em modo de arrasto.
Fonte: Autores.

6. ANÁLISE DE PATENTES

As patentes são divididas em seções ou áreas de conhecimento e subdivididas em classes. Os resultados da colaboração acadêmica e de empresas, resultou numa abordagem multidisciplinar abrangendo áreas como Engenharia, Combustíveis Energéticos, Telecomunicações, Transporte, Ciência de Polímeros, Ciência da Computação, Eletroquímica, Sistemas de Controle de Automação e Ciência de Materiais. A Tabela 6 apresenta as patentes, a classificação das patentes, os temas centrais, o nome do depositário e o inventor mais citados. As patentes analisadas são das classes X15, Q54, W06, Q25, P36, X12, T12, T01, W04, Q24, X13 e Q38, e podem ser agrupadas. As classes X15, X13 e X12 fazem parte da seção de engenharia de energia elétrica, as classes Q24, Q25, Q38 e Q54, da seção de Mecânica, abordando veículos especiais. As classes

W06, W04 fazem parte da seção de Comunicações abordando principalmente sistemas de aviação, equipamento de medição de velocidade e profundidade, controle e instrumentação de navios e aeronaves, simuladores de voo e veículos espaciais. A classe P36 faz parte da seção de entretenimento, já as classes T12, T01 fazem parte da seção de computação e controle. A Classificação Internacional de Patentes (IPC) classifica as patentes e modelos de utilidade de acordo com a área de tecnologia. As Tabelas 3 e 5 mostram as principais IPC baseados em dados de patentes neste estudo. A maioria das patentes encontradas são codificadas como F03D que está relacionada a Engenharia de Energia Elétrica, especificamente com sistemas de geração de energia para combustíveis não fósseis, energia geotérmica, eólica, de ondas e solar e tipos de geração de energia, seguido pela codificação B64C que está vinculada a engenharia mecânica, específicos com veículos especiais (aeronaves, aviação). Estes códigos são responsáveis pela maioria das patentes discutidas neste artigo. Além disso, esses códigos são baseados em conceitos técnicos relacionados a tecnologia AWE isto é, geração de energia aerotransportada abordado no estudo. As três patentes mais citadas são pesquisas desenvolvidas por Damon Vander Lind sendo o autor mais citado e de responsabilidade da empresa *Makani Power Inc.*, com o apoio do Google X e da Agência de Projetos de Pesquisa Avançada - Energy ARPA-E do governo dos Estados Unidos. A *Makani Power Inc* usa uma asa aerodinâmica cabeada a uma estação terrestre para aproveitar a energia do vento e produzir eletricidade. A empresa patenteou uma configuração de pipa e uma estratégia de voo para voos em alta velocidade, um sistema de pipa com uma estação terrestre adaptada para awes e uma configuração para estabilidade de uma pipa cabeada, todas as três invenções pertencem à classe B64C. A tecnologia AWE da *Makani* integra engenharia aeroespacial, ciência de materiais e controles autônomos.

Áreas Temáticas	R	Código de classe Derwent	F	Nome do Depositário	R	Inventor	R	Patentes	Total
Engineering	275	X15 - Non-Fossil Fuel Power Generating Systems	183	GOOGLE INC	54	VANDER LIND D	49	US20120104763-A1	46
Instruments Instrumentation	259	Q54 - Non-positive displacement fluid engines	124	X DEV LLC	45	HATCHMANN B	19	US20130221679-A1	41
Energy Fuels	195	W06 - Aviation, Marine and Radar Systems	61	VANDER LIND D	11	ANDREEV S P	13	US20110260462-A1	35
Telecommunications	77	Q25 - Aircraft, aviation, cosmonautics (B64)	41	HACHTMANN B	8	CHERNIN S YA	13	US6254034-B1	34
Transportation	56	P36 - Sports, games, toys (A63, B68B, C)	40	ST PETERSBURG SCI CULTURE SPORT	8	NOVIKOV E F	13	US20100295303-A1	31
Sport sciences	40	X12 - Power Distribution/ Components/Converters	18	GOLDSTEIN L	7	SELEZNYOV D G	13	US7317261-B2	29

Polymer science	22	T01 - Digital Computers	16	XI AN DAYU OPTOELETRONIC SCI TECHNOLO	6	PATTEN E W	11	US20070176432-A1	28
Computer science	17	W04 - Audio/Video Recording and Systems	14	LI Y	5	JENSEN K	10	US20130221154-A1	27
Electrochemistry	17	Q24 - Ships (B63)	10	INNER MONGOLIA GEOHO ENERGY EQUIP CO LTDA	4	CASEY L	10	US20100013236-A1	27
Automation control systems	8	X13 - Switchgear, Protection, Electric Drives	10	SKY WINDPOWER CORP	4	LI Y	9	US20110121570-A1	23
Materials science	6	Q38 - Hoisting, lifting, hauling (B66)	9	BEIJING QIXIANG INNOVATION TECHNOLOGY	3	GOLDSTEIN L	7	US20100032948-A1	22

Tabela 06 - Itens mais citados.

Fonte: Autores.

7. CONCLUSÃO E DISCUSSÃO

Nas últimas décadas o mundo tem observado um aumento acelerado da demanda de energia. Toda essa demanda de energia tem sido suprida desde a revolução industrial por fontes fósseis como carvão, petróleo e gás natural, fontes que estão em desacordo com o meio ambiente, contribuindo significativamente para um processo de aquecimento global e para a mudança climática.

No entanto, o mundo também tem presenciado uma revolução na área tecnológica, em termos de acesso, desempenho, processamento e robustez. Essa revolução permitiu que as fontes de energias renováveis, que causam pouco impacto ambiental fossem pesquisadas e desenvolvidas como uma alternativa para geração de energia e o desenvolvimento sustentável. O potencial de conversão de airborne wind energy tem sido investigado como pesquisas teóricas, exploratórias e experimentais como um recurso favorável para a produção sustentável de energia eólica.

O futuro econômico dos sistemas de airborne wind energy estão se apresentado como promissores e o desenvolvimento de protótipos desenvolvidos em empresas e universidades, estão em andamento e num futuro próximo espera-se o desenvolvimento em escala comerciais. Como o sistema de regulamentação para uso do espaço aéreo para sistemas de AWE ainda não está definido. Os protótipos em desenvolvimento operam com permissões especiais, sendo autorizações de operação emitidas por autoridades locais de aviação. Este artigo apresentou pesquisas teóricas, experimentais e de simulação desenvolvida por empresas e universidades para capturar energia eólica em altas altitudes com uso de aerofólios cabeados. Foram apresentados conceitos básicos da geração AWE, bem como os protótipos implementados e patentes aplicadas. Os protótipos apresentados mostram desde uma configuração muito simples como também configuração robusta e cara.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento deste projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Ahmed, M., Hably, A., and Bacha, S. (2012). High altitude wind power systems: A survey on flexible power kites. In *20th International Conference on Electrical Machines*, pages 2083–2089, Marseille, France.
- Ahrens, U. (2006). Wind-operated power generator. Ahrens, U. (2007). Method and system for converting kinetic energy contained in horizontal flows into useful mechanical energy.
- Ahrens, U., Diehl, M., and Schmehl, R., editors (2014a). *Airborne Wind Energy*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, London.
- Ahrens, U., Pieper, B., and Töpfer, C. (2014b). In Ahrens, U., Diehl, M., and Schmehl, R., editors, *Airborne Wind Energy*, chapter Combining Kites and Rail Technology into a Traction-Based *Airborne Wind Energy*. Plant, pages 437–458. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, London.
- Altaeros (2015). Clean energy. Technical report, ALTAEROS.
- ANEEL (2018). Capacidade de Geração do Brasil. Technical report, Aneel, Brasil.
- Archer, C. L. and Caldeira, K. (2009). Global assessment of high-altitude wind power. *Energies*, 2:307–319.
- Archer, C. L. and Jacobson, M. Z. (2005). Evaluation of global wind power. *Journal of Geophysical Research*, 110.
- Argatov, I., Rautakorpi, P., and Silvennoinen, R. (2009). Estimation of the mechanical energy output of the kite wind generator. *Renewable Energy*, 34(6):1525–1532.

- Argatov, I. and Silvennoinen, R. (2010). Energy conversion efficiency of the pumping kite wind generator. *Renewable Energy*, 35(5):1052–1060.
- Bevirt, J. (2009). System and method for generating electrical power using a tethered airborne power generation system.
- Bevirt, J., Craig, D. D., Ibara, A. H., Kroo, I., Biddison, G., and Gibboney, J. K. (2008). System and method for airborne cyclically controlled power generation using autorotation.
- Bevirt, J. and Peddie, M. (2009). System and method for controlling a tethered flying craft using tether attachment point manipulation.
- Bormann, A., Skutnik, S., Gebhardt, C., and Ranneberg, M. (2012). Tethered wing system for wind energy use.
- Bryan, W. R., David, H. S., Ken, C., M. Elizabeth, C., David, G. E., Albert, J. G., and Jonathan, F. F. (2007). Harnessing high-altitude wind power. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 22(1):136–144.
- Canale, M., Fagiano, L., Ippolito, M., and Milanese, M. (2006). Control of tethered airfoils for a new class of wind energy generator. *45th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 4020–4026.
- Canale, M., Fagiano, L., and Milanese, M. (2007a). Kitegen project: control as key technology for a quantum leap in wind energy generators. *2007 American Control Conference*, 1-13(6):3522–3528.
- Canale, M., Fagiano, L., and Milanese, M. (2007b). Power kites for wind energy generation fast predictive control of tethered airfoils. *IEEE Control Systems Magazine*, 27(6):25–38.
- Canale, M., Fagiano, L., and Milanese, M. (2010). High altitude wind energy generation using controlled power kites. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18(2):279–293.
- Carnel, L. and Hårklau, T. (2015). Kitemill, a driver of second-generation wind energy! In Schmehl, R., editor, *Book of Abstracts of the International Airborne Wind Energy Conference 2015*, page 25. Institutional Repository, Faculty of Aerospace Engineering - Delft University of Technology, Netherlands.
- Chaudhari, R. (2015). Electric energy generation by magenn air rotor system (mars). *International Journal of Computer Science and Network*, 4:314–317.
- Cherubini, A., Papini, A., Vertechy, R., and Fontana, M. (2015). Airborne wind energy systems: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (51):1461–1476.
- Creighton, R. and Mizzi, J. V. (2016). Tethered airfoil methods and systems.
- De Lellis, M., Mendonça, A. K., Saraiva, R., Trofino, A., and Lezana, A. (2016). Electric power generation in wind farms with pumping kites: An economical analysis. *Renewable Energy*, 86:163–172.
- Diehl, M. (2001). *Real-Time Optimization for Large Scale Nonlinear Processes*. PhD thesis, Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg, Germany.
- Diehl, M. (2018). In Schmehl, R., editor, *Airborne Wind Energy -Advances in Technology Development and Research*, chapter Foreword, pages vii–x. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, London.
- E-kite (2018). Te-kite’s first commercial system. Technical report, E-kite. Accessed Online on April 20, 2018.
- Fagiano, L. (2009). *Control of Tethered Airfoils for High-Altitude Wind Energy Generation*. PhD thesis, Politecnico di Torino, Torino, Italy.
- Fagiano, L. and Milanese, M. (2011). System for converting wind energy into electrical energy through the flight of power wing profiles tethered to the ground by cables of a fixed length, without passive phases, and with automatic adaptation to wind conditions.
- Fagiano, L. and Milanese, M. (2012). Airborne wind energy: an overview. In *American Control Conference*, pages 3132–3143, Montreal, Canada. IEEE.
- Fagiano, L., Milanese, M., and Piga, D. (2010a). High-altitude wind power generation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(1):168–180.
- Fagiano, L., Milanese, M., and Piga, D. (2010b). High-altitude wind power generation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(1):168 – 180.
- Glass, B. W. (2008). Lighter-than-air craft for energy-producing turbines.
- GmbH, E. (2018a). Airborne wind energy. Technical report, ENERKITE GmbH. Accessed Online on April 20, 2018.
- GmbH, N. (2018b). Generating renewable energy according to the x-wind principle.
- Griffith, S., Lynn, P., and Hardham, C. (2007a). Wind power generation.
- Griffith, S., Lynn, P., Montague, D., and Hardham, C. (2007b). Bimodal kite system.
- Griffith, S., Lynn, P., Montague, D., and Hardham, C. (2008). Faired tether for wind power generation systems.
- GWEC (2018). Global wind statistics 2017.
- Hornzee-Jones, C. and Hampton, W. (2014a). Kite with controllable trailing edge.

- Hornzee-Jones, C. and Hampton, W. (2014b). Winch.
- Houska, B. and Diehl, M. (2007). Optimal control for power generating kites. In *Proceedings of the European Control Conference 2007*, pages 3560–3567, Kos, Greece.
- IEA (2013). Technology roadmap: Wind energy. Paris, France.
- IEA (2015). Energy and climate change - world energy outlook special report. Paris, France.
- Ilzhoer, A., Houska, B., and Diehl, M. (2007). Nonlinear mpc of kites under varying wind conditions for a new class of large-scale wind power generators. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 17(17):1590–1599.
- InsolvenzPortal (2018). Technical report, InsolvenzPortal.
- IPCC (2012). Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation Special Report. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2014). Climate change 2014: Mitigation of climate change.
- Ippolito, M. (2006). System and process for automatically controlling the flight of power wing airfoils.
- Ippolito, M. (2012). Wind energy conversion system by moving on rail modules towed by kites and electrical energy generation process by means of such system.
- Ippolito, M. (2015). Schwimmende offshore-Infrastruktur zur Nutzung von Windkraft.
- Ippolito, M. and Taddei, F. (2006). Aeolian system comprising power wing profiles and process for producing electric energy.
- Ippolito, M. and Taddei, F. (2007). Wind system for converting energy by translating on a rail modules dragged by kites and process for producing electric energy through such system.
- JOBYENERGY (2018). More power more often, for less. Technical report, JOBYENERGY.
- KITEGEN (2016). Kitegen research. Technical report, KITEGEN, Itália.
- KITENERGY (2018). Automatically controlled wing to harvest high-altitude wind energy. Technical report, KITENERGY.
- KPS (2018). Technical report, KPS energy. Accessed Online on April 12, 2018.
- Kruijff, M. (2017a). The technology of airborne wind energy - part i: Launch & land. Technical report, Ampyx Power B.V. Accessed Online on April 12, 2018.
- Kruijff, M. (2017b). The technology of airborne wind energy - part ii: the drone. Technical report, Ampyx Power B.V. Accessed Online on April 12, 2018.
- Kruijff, M. (2017c). The technology of airborne wind energy - part iii safe power. Technical report, Ampyx Power B.V. Accessed Online on April 12, 2018.
- Lellis, M. D., Saraiva, R., and Trofino, A. (2016). Airborne wind energy: Automatic flight test.
- Lind, D. V. (2014). Radiator and duct configuration on an airborne wind turbine for maximum effectiveness.
- Lind, D. V., Niekerk, B. V., and Hardham, C. (2009). Tethered system for power generation.
- Loyd, M. (1980). Crosswind kite power. *Journal of Energy*, 4(3):106–111.
- Luchsinger, R., Aregger, D., Bezard, F., Costa, D., Galliot, C., Gohl, F., Heilmann, J., Hesse, H., Houle, C., Wood, T. A., and Smith, R. S. (2018). In Schmehl, R., editor, *Airborne Wind Energy - Advances in Technology Development and Research*, chapter 24 - Pumping Cycle Kite Power with Twings, pages 603–621. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, London.
- Makani, P. (2014). Airborne wind turbines.
- Mendonça, A. K. S., Vaz, C. R., Lezana, A. R. G. and Anacleto, C. A., and Paladini, E. P. (2017). Comparing patent and scientific literature in airborne wind energy. *Sustainability*, 9:915–937.
- Milanese, M. and Gerlero, L. F. I. (2010). Actuating systems for controlling the flight of a power wing profile for conversion of wind energy into electrical or mechanical energy.
- Milanese, M., Milanese, A., and Novara, C. (2006). Automatic kite flight control system.
- NTS (2014). Nature technology systems. Technical report, NTS, Germany.
- Ockels, W. (2001). Laddermill, a novel concept to exploit the energy in the airspace. *Aircraft Design*, 4:81–97.
- Pardal, T. C. D. and Freire, M. A. B. D. A. (2006). Atmospheric resources explorer.
- Pardal, T. C. D. and Silva, P. M. M. D. S. (2011). Airborne platform.
- Perkovic, L., Silva, P., Ban, M., Kranjcevic, N., and Duic, N. (2013). Harvesting high altitude wind energy for power production: The concept based on magnus? effect. *Applied Energy*, (101):151–160.
- Power, M. (2018). Magenn power air rotor system. Technical report, Magenn Power Inc.
- Read, R. (2018a). In Schmehl, R., editor, *Airborne Wind Energy -Advances in Technology Development and Research*, chapter Kite Networks for Harvesting Wind Energy, pages 515–537. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, London.
- Read, R. (2018b). Windswept & interesting make scalable low-carbon, flying wind turbines. Technical report,

Windswept.

Roberts, B. W., Shepard, D. H., Caldeira, K., Cannon, M. E., Eccles, D. G., Grenier, A. J., and Freidin, J. F. (2007). Harnessing high-altitude wind power. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(1):136–144.

Ruiterkamp, R. (2012a). Glider for airborne wind energy productions.

Ruiterkamp, R. (2012b). System and method for airborne wind energy production.

Ruiterkamp, R., Salma, V., and Kruij, M. (2015). Update on certification and regulations of airborne wind energy systems - the european case for rigid wings. In Schmehl, R., editor, *Book of Abstracts of the International Airborne Wind Energy Conference 2015*, page 78. Institutional Repository, Faculty of Aerospace Engineering - Delft University of Technology, Netherlands.

Saraiva, R., Lellis, M., and Trofino, A. (2014). Passive phase design of a pumping kite wind generator. In 19th *IFAC World Congress*, pages 6764–6769, Cape Town, South Africa. IFAC.

Schmehl, R. (2015a). *Airborne Wind Energy Conference: Book of Abstracts*. Institutional Repository, Faculty of Aerospace Engineering - Delft University of Technology, Netherlands.

Schmehl, R. (2015b). Welcome to the airborne wind energy conference 2015. In Schmehl, R., editor, *Book of Abstracts of the International Airborne Wind Energy Conference 2015*, page 4. Institutional Repository, Faculty of Aerospace Engineering - Delft University of Technology, Netherlands.

Schmehl, R., editor (2018). *Airborne Wind Energy - Advances in Technology Development and Research*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, London.

Sequoia (2014). Patents and research. Technical report, Sequoia. SKYSAILS (2014). Wind propulsion and high-altitude wind power. Technical report, SKYSAIL, Germany.

SKYWindPower (2016). Flying electric generators. Technical report, SKYWindPower.

STOUGH, A. J. and AULL, M. J. (2016a). Hybrid rolling bridle system for distributing load while permitting freedom of rotation.

STOUGH, A. J. and AULL, M. J. (2016b). Variable cross section tether. Vermillion, C. R., Glass, B. W., and Goessling, A. D. (2011). Systems and methods for attitude control of tethered aerostats.

Vlugt, R. V. D., Peschel, J., and Schmehl, R. (2014). Design and experimental characterization of a pumping kite power system in airborne wind energy. In Ahrens,

U., Diehl, M., and Schmehl, R., editors, *Airborne Wind Energy*, chapter 23, pages 403–425. Springer, London.

Webster, B. (2018). First wind farm to be built powered by kites. Technical report, The Times.

Williams, P., Lansdorp, B., and Ockels, W. (2008). Optimal crosswind towing and power generation with tethered kites. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 31(1):81–93.

WOO, Y. S. and Woo, C. D. (2014). Medium/large electricity generator equipped with automatically winding and un-winding kite cable mechanism for minimum energy loss.

Wrage, S. and Brabeck, S. (2006). Launch and retrieval arrangement for an aerodynamic profile element and an aerodynamic profile element.

Wrage, S. and Böhm, J. (2004). Placement system for a flying kite-type wind-attacked element in a wind-powered watercraft.

Wrage, S. and Muller, S. (2004). Watercraft comprising a free-flying kite-type wind-attacked element as a wind-powered drive unit.

Zanon, M., Gros, S., Meyers, J., and Diehl, M. (2014). Airborne wind energy: Airfoil-airmass interaction. *IFAC PAPERSONLINE*, 47(3):5814–5819. 19th World Congress of the International-Federation-of-Automatic-Control (IFAC), Cape Town, SOUTH AFRICA, AUG 24-29, 2014.

Zillmann, U. and Hach, S. (2014). Financing strategies for airborne wind energy. In Ahrens, U., Diehl, M., and Schmehl, R., editors, *Airborne Wind Energy*, chapter 7, pages 117–137. Springer, London.

AUTORES

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1640-8935>

ANNY KEY DE SOUZA MENDONÇA, Dra. | Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) | Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) | Florianópolis, SC – Brasil | Correspondência para: (Servidão do Porto, 165, Lagoa da Conceição, Florianópolis-SC, 88062-503) | E-mail: annykeysmendonca@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3468-7536>

ANTONIO CEZAR BORNIA, Dr. | Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) | Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) | Florianópolis, SC – Brasil | Correspondência para: (UFSC/CTC/EPS - CP 476 - Campus Universitário, Florianópolis, SC, 88040-900) | E-mail: cezar.bornia@ufsc.br

COMO CITAR ESTE ARTIGO

MENDONÇA, Anny Key de Souza; BORNIA, Antonio Cezar. Energia Eólica Aerotransportada: Uma Revisão da Tecnologia. **MIX Sustentável, [S.l.], v. 6, n. 1, p. 105-121, mar. 2020.** ISSN 24473073. Disponível em: <<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>>. Acesso em: dia mês. ano. doi:<https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n1.105-121>.

DATA DE ENVIO: 10/10/2019

DATA DE ACEITE: 16/01/2020

