



Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Centro Tecnológico – CTC

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas – PPGEAS

Tema de Mestrado:

## Filtragem e Estimação para Aerogeradores com Aerofólios Cabeados

Proponente:

Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira

Florianópolis, 28 de junho de 2018.

### 1 Contextualização

As atividades de pesquisa considerarão como objeto de estudo um conceito inovador de aerogerador, baseado na tecnologia AWE – *Airborne Wind Energy (AWE)*, do inglês [2]. A ideia desta tecnologia é fazer com que o dispositivo que extrai energia do vento (o aerofólio) se mantenha no ar por conta própria, seja através de forças aerostáticas ou aerodinâmicas, e prender tal dispositivo ao solo através de um ou mais cabos. Uma comparação entre a tecnologia eólica convencional e a AWE é ilustrada na Fig. 1.

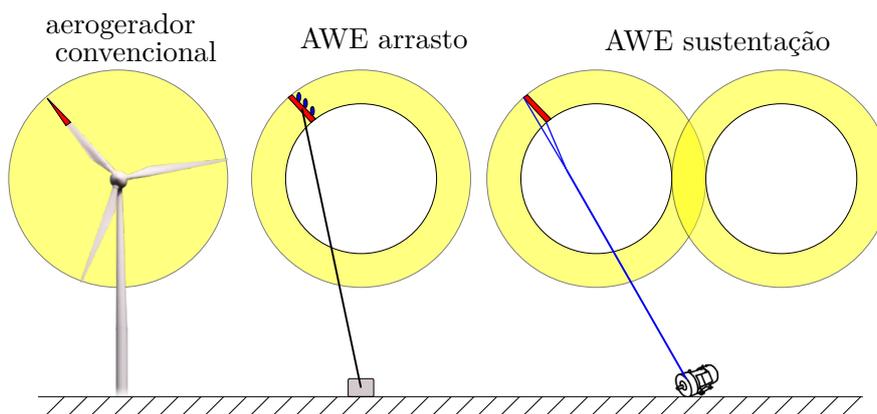


Figura 1: Comparação entre os princípios de funcionamento da tecnologia convencional de energia eólica e a tecnologia de AWE (aerofólios cabeados).

Devido à ausência de uma torre que fixa a altitude de operação, é possível operar o aerofólio em altitudes mais elevadas, onde o vento tende a soprar com maior velocidade e de forma mais constante, o que caracteriza um potencial energético maior. Além disso, devido a uma redução drástica no volume de material necessário à construção do aerogerador AWE, estima-se que os

custos de material, transporte e instalação sejam bastante reduzidos. Finalmente, a hipótese é que o custo nivelado da energia gerada por um sistema AWE seja inferior àquele obtido com aerogeradores convencionais.

No modo AWE de arrasto a geração elétrica é realizada por turbinas acopladas a geradores *on-board*: a potência mecânica entregue a cada turbina resulta do produto entre a velocidade do vento aparente que incide na turbina e o empuxo sobre ela. Já no modo AWE de sustentação o gerador está no solo e é acoplado a um carretel ao redor do qual está enrolado o cabo que prende o aerofólio. Neste caso a potência entregue ao gerador resulta do produto entre a velocidade de desenrolamento do cabo e a velocidade com que o cabo é desenrolado. Antes que termine a quantidade de cabo enrolada no carretel, é finalizado o desenrolamento, o aerofólio é reconfigurado para uma condição de baixo desempenho aerodinâmico, e conseqüentemente o cabo pode ser enrolado a uma baixa tração e grande velocidade até que o comprimento inicial para o recomeço do ciclo de geração seja atingido. Assim, ao final do recolhimento há uma média positiva de energia gerada. Devido a esta característica cíclica de operação, sistemas AWE de sustentação são comumente chamados de *pumping kites*.

## 2 Motivação

A eficiência no aproveitamento da energia cinética do vento depende da trajetória de voo do aerofólio. Para que tal trajetória possa ser otimizada, é necessário ter-se um modelo da dinâmica de voo com seus **parâmetros** devidamente **identificados**, principalmente no que diz respeito aos coeficientes aerodinâmicos do aerofólio e do cabo. No caso de asas rígidas, como as de um avião, os coeficientes aerodinâmicos de arrasto e sustentação são tipicamente identificados por meio de testes em túnel de vento. Entretanto, no caso de aerofólios flexíveis, como um parapente de voo ou livre ou de *kite surf*, tais testes tornam-se inviáveis e os fabricantes têm dificuldade em quantificar os coeficientes aerodinâmicos. Outra questão importante para a operação dos aerofólios cabeados é a **filtragem e estimação dos estados** do modelo mencionado. Isto é necessário devido a ruídos nos sensores, além de que nem todos os estados podem ser calculados diretamente dos sensores. Para resolver estes dois problemas são usados observadores de estados como o Filtro de Kalman.

Em [3, 4] foi proposto um modelo da dinâmica de voo em coordenadas naturais<sup>1</sup>, a partir do qual foi projetado um Filtro de Kalman Estendido (EKF) para estimação dos estados e dos coeficientes de arrasto e sustentação do aerofólio. Apesar dos bons resultados preliminares, acredita-se que o desempenho do filtro teria sido significativamente melhor se houvesse uma medição direta do vento aparente que incide no aerofólio. Tal medição poderia ser concretizada por meio de uma pequena turbina acoplada a um tacogerador, por exemplo. Outra perspectiva futura levantada naquele trabalho foi a investigação de outros filtros, que talvez pudessem apresentar desempenho melhor que o EKF neste contexto. Além disso, ficou em aberto o problema de identificar o coeficiente de arrasto aerodinâmico do cabo, com o qual poderia-se

---

<sup>1</sup>Coordenadas cartesianas.

isolar o respectivo coeficiente do aerofólio.

É importante mencionar também que a estimação *on-line* dos parâmetros do sistema AWE permite um monitoramento da degradação natural (ou não) do aerofólio e do cabo durante a operação. Conseqüentemente é possível prever a necessidade de manutenção dos componentes, contribuindo para um aumento da eficiência e segurança na operação.

### 3 Objetivos

Tendo em vista o que foi exposto, podem ser listados os seguintes objetivos de pesquisa:

1. O teste de estruturas de filtragem e estimação de estados alternativas ao EKF projetado em [3], no contexto de um estudo comparativo.
2. A verificação da influência de uma medição direta de vento aparente no aerofólio cabeado sobre o desempenho do EKF proposto em [3].
3. Com base no(s) filtro(s) acima, a identificação do coeficiente de arrasto aerodinâmico do cabo.

### 4 Metodologia

A pesquisa iniciará com uma revisão bibliográfica sobre AWE e os últimos avanços com relação aos objetivos estabelecidos. Logo então será feito um esforço de implementação (preferencialmente em Matlab/Simulink) de um modelo de simulação da dinâmica de voo bem estabelecido na literatura, encontrado por exemplo em [1], seguido pela implementação do filtro EKF proposto em [3], na tentativa de reproduzir os resultados atingidos naquele trabalho em ambiente de simulação.

Com relação ao objetivo 1, serão levantadas alternativas ao EKF, as quais serão implementadas, testadas e terão seus resultados comparados aos do EKF. No que tange ao objetivo 2, propõe-se desenvolver um modelo matemático de um sensor baseado em pequena turbina para a medição de vento aparente e utilizá-lo no (re)projeto do filtro. Com isto será possível verificar a influência do sensor proposto no desempenho do filtro. Finalmente, com relação ao objetivo 3 a ideia é valer-se da propriedade de que o arrasto total do cabo depende, entre outras coisas, do seu comprimento (em voo). Com isso e sabendo-se que o comprimento de cabo varia durante um ciclo de operação (*pumping cycle*), acredita-se ser possível desenvolver um algoritmo/método capaz de estimar o coeficiente de arrasto do cabo de maneira isolada ao do aerofólio.

### 5 Resultados Esperados

Espera-se que os resultados desta pesquisa contribuam para o desenvolvimento da tecnologia AWE, alinhado a políticas nacionais e internacionais de fomento à exploração de fontes renováveis

de energia. Para isso, além da escrita da dissertação, espera-se publicar os resultados em congresso e/ou em um periódico como o *Control Engineering Practice*, da editora Elsevier, ou o *IEEE Transactions on Control Systems Technology*.

## 6 Requisitos Desejados do Pesquisador

É desejável que o aluno/pesquisador tenha conhecimentos sólidos em: (a) modelagem de sistemas dinâmicos; (b) Matlab/Simulink; (c) observadores de estados (Filtro de Kalman e semelhantes); e (c) na língua inglesa (bom domínio da escrita).

## Referências Bibliográficas

- [1] L. Fagiano. *Control of tethered airfoils for high-altitude wind energy generation*. PhD thesis, Politecnico di Torino, 2009.
- [2] R. Schmehl, editor. *Airborne Wind Energy – Advances in Technology Development and Research*. Green Energy and Technology. Springer Singapore, 1 edition, 2018. Hardcover ISBN 978-981-10-1946-3.
- [3] E. Schmidt, M. De Lellis, R. Saraiva, and A. Trofino. State estimation of a tethered airfoil for monitoring, control and optimization. In *Proceedings of the 20th IFAC World Congress*, volume 50–1, pages 13246 – 13251, Toulouse, France, July 2017. IFAC. doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1960.
- [4] E. F. Schmidt. A state estimation strategy for monitoring, control, and optimization of airborne wind energy systems. Master’s thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brazil, 2017.