



Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC  
Centro Tecnológico – CTC

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

Proposta de Mestrado:

## **Instrumentação e Controle de Tração em Aerogeradores com Aerofólios Cabeados**

Orientador:

Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira

Coorientador:

Prof. Alexandre Trofino Neto

Florianópolis, 28 de junho de 2019.

# 1 Contextualização

Visando tornar a energia eólica mais barata e viável em um número maior de localidades, a tecnologia de aerofólios cabeados – ou *Airborne Wind Energy* (AWE), em inglês – vem sendo objeto de um número crescente de pesquisas. A ideia com essa tecnologia é substituir as pás de um aerogerador convencional por um aerofólio (asa) capaz de se manter no ar por conta própria, seja por forças aerodinâmicas ou aerostáticas. Tal aerofólio é preso ao solo com um ou mais cabos em substituição à torre do aerogerador convencional, como ilustrado na Fig. 1. Com isso, estima-se que os aerogeradores com aerofólios cabeados consigam produzir energia elétrica a um custo inferior ao da tecnologia convencional, além de outras vantagens importantes. Em primeiro lugar, a substituição da torre por um ou mais cabos de comprimento variável permite ao aerofólio operar em altitudes maiores, onde o vento é mais forte e consistente, o que caracteriza um potencial energético maior. Isto, por sua vez, contribui para que localidades próximas aos grandes centros de consumo tornem-se viáveis para a instalação de parques eólicos, reduzindo as perdas na transmissão de energia. Além disso, a tecnologia AWE acarreta uma redução substancial nos custos do aerogerador, especialmente em material, transporte e instalação, devido à ausência de uma torre que deva suportar os esforços mecânicos elevados decorrentes da operação da turbina. Também espera-se que a fundação para o ponto de ancoragem do aerofólio ao solo se torne mais simples e barata.

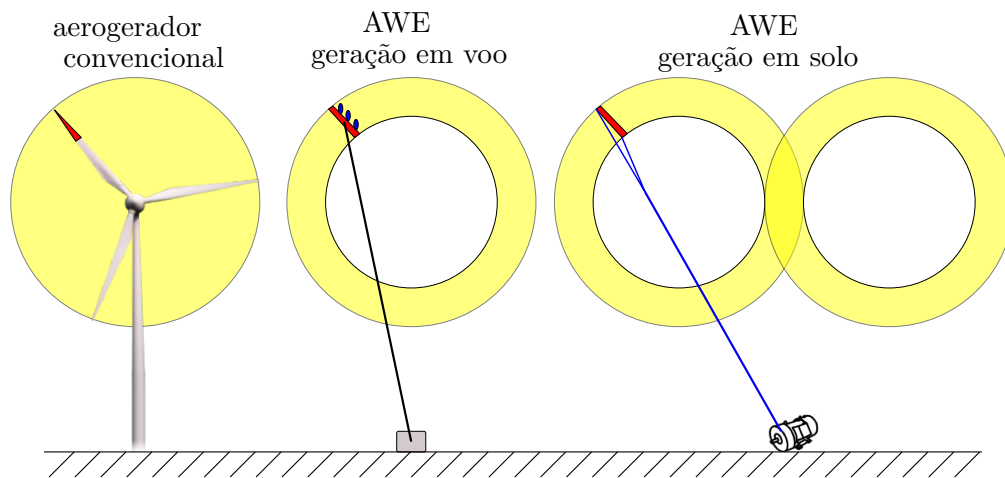


Figura 1: Comparação entre a tecnologia eólica convencional e a de aerofólios cabeados (AWE).  
Fonte: adaptado de (De Lellis, 2016).

Os aerofólios cabeados que se mantêm em voo por forças aerodinâmicas podem operar com geração elétrica em voo ou em solo. Na geração em voo o aerofólio é como um avião em cujas asas são montadas turbinas elétricas pequenas, leves e que operam em alta rotação. Enquanto o aerofólio descreve uma trajetória similar à das pontas das pás de um aerogerador convencional, a potência gerada resulta do produto entre a velocidade do vento que incide nas turbinas e o empuxo sobre elas. A eletricidade gerada é transmitida através do cabo à infraestrutura elétrica de condicionamento e transmissão no solo.

Já no caso da geração em solo, a potência gerada resulta do produto entre a força de tração do cabo e a velocidade com que ele é desenrolado enquanto o aerofólio voa em uma trajetória

tipicamente em forma de “oito-deitado” para maximizar a força de tração (e conseqüentemente a potência) sem acumular torção no cabo. Após um determinado comprimento de cabo haver sido desenrolado, o aerofólio é reconfigurado para uma condição de baixa eficiência aerodinâmica, causando uma ampla redução na força de tração. Com isso, o gerador passa a atuar como motor, recolhendo rapidamente o cabo (e o aerofólio) em uma trajetória que requer apenas um pequeno gasto de energia. Quando o comprimento inicial de cabo é atingido, tem-se um saldo positivo de energia gerada e então inicia-se um novo ciclo de operação. Devido a tal comportamento cíclico, esse tipo de sistema AWE é comumente chamado de *pumping kite*.

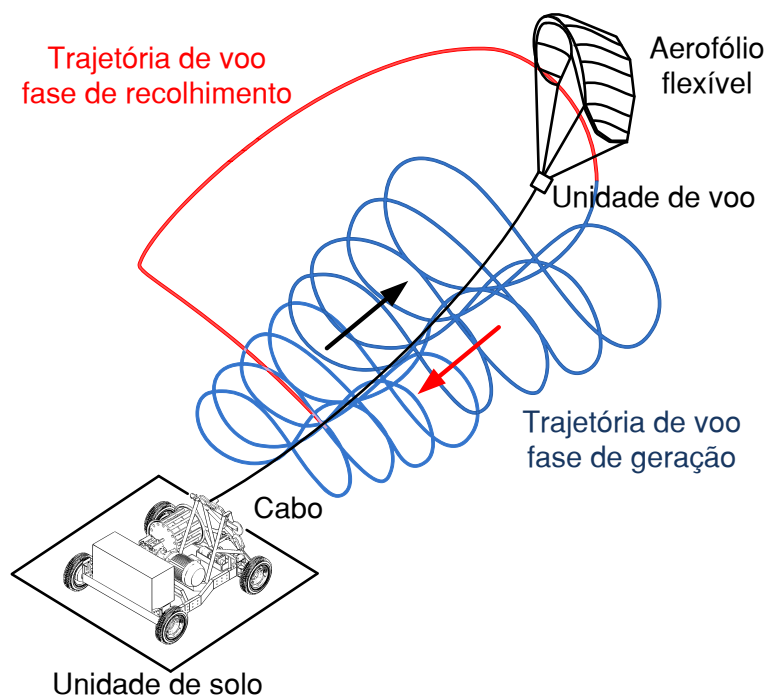


Figura 2: Conceito de aerogerador AWE do tipo *pumping kite*. Fonte: (ARAUJO, 2017).

## Projeto UFSCkite

Em um levantamento feito em 2017 e apresentado na Fig. 3, foram contabilizados 63 grupos de pesquisa em AWE ao redor do mundo. Entre eles encontra-se o grupo brasileiro UFSCkite, pioneiro e único na América Latina. Estabelecido no final de 2012 no Departamento de Automação e Sistemas (DAS) do Centro Tecnológico (CTC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), o objetivo do projeto UFSCkite é desenvolver a tecnologia AWE em âmbito nacional, alinhado com os interesses estratégicos de ciência, tecnologia e inovação do país. Com isso espera-se que, em um horizonte de 10 anos, a tecnologia desenvolvida possa ser incorporada à matriz energética, beneficiando a sociedade brasileira por meio da geração de energia elétrica renovável a um custo mais baixo que o atual e em um número maior de localidades. Paralelamente a isso, as atividades realizadas pelo grupo servem de apoio à formação de profissionais qualificados de nível superior e ao fomento à pesquisa nos níveis de graduação, mestrado e doutorado. O UFSCkite também recebe pós-doutores e estudantes de intercâmbio de outros países, colaborando, dessa forma, para o estreitamento de laços de cooperação entre

as universidades brasileiras e estrangeiras.

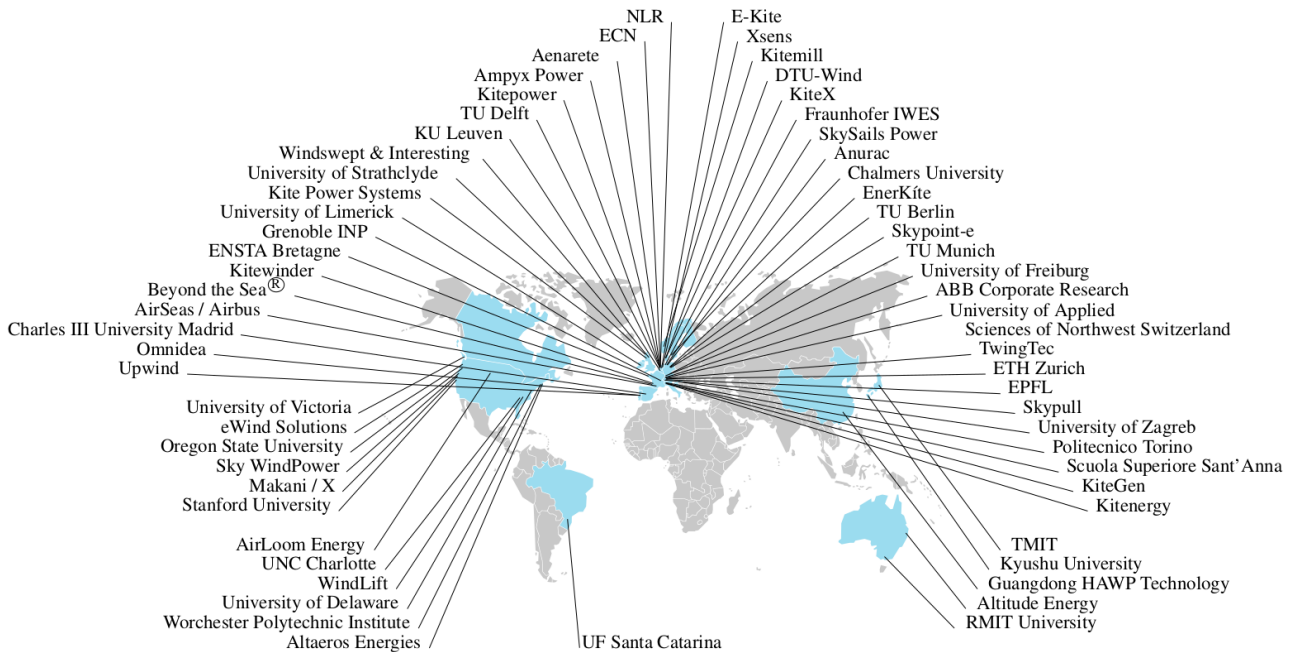


Figura 3: Instituições envolvidas com pesquisa e desenvolvimento em AWE. Fonte: (SCHMEHL, 2018).

O UFSCkite desenvolve, em laboratório próprio, protótipos de sistemas AWE com geração no solo, que podem ser operados (mas não se limitam) à configuração *pumping kite* apresentada na Fig. 2. Trata-se de um projeto bastante multidisciplinar, com ênfase nas seguintes áreas:

- **controle:** diferentes estratégias são desenvolvidas para o controle de voo, controle de tração do cabo e controle (hierárquico) dos modos de operação do sistema;
- **filtragem e estimação:** é necessário filtrar as leituras dos sensores e estimar parâmetros a priori desconhecidos, como os coeficientes aerodinâmicos do aerofólio e a velocidade do vento;
- **sistemas supervisórios:** juntamente com o desenvolvimento dos protótipos está em constante aprimoramento um sistema de controle supervisório e aquisição de dados (SCADA) para interface do operador humano com o aerogerador e o armazenamento de dados da operação;
- **sistemas embarcados:** as unidades de solo e de voo têm sistemas embarcados responsáveis por tarefas como sensoriamento, filtragem, controle e comunicação;
- **estruturas mecânicas e aerodinâmicas:** é necessário projetar a estrutura mecânica das unidades de solo e de voo bem como estruturas mecânicas (pequenas torres) para pouso, decolagem e operação do aerofólio cabeado. Na Fig. 4 é apresentado o projeto CAD da nova unidade de voo.



Figura 4: Projeto em CAD da unidade de voo. Fonte: acervo UFSCkite.

- **Máquinas e acionamentos elétricos:** é necessário configurar e operar o inversor de frequência que faz o controle do torque elétrico e velocidade da máquina elétrica, que pode atuar tanto como gerador e motor.
- **Eletrônica de potência:** além da geração elétrica principal, está em desenvolvimento um sistema de microgeração eólica de 60 W para a alimentação contínua dos atuadores de controle de voo e eletrônica embarcados.
- **Instrumentação:** para a operação do aerogerador é necessário medir e processar informações como velocidade do vento, posição do aerofólio e tração do cabo.
- **Medição de vento em altitude:** para viabilizar a prospecção de localidades para implantação da tecnologia AWE, está em desenvolvimento uma estação de medição do perfil de vento para altitudes até 600 m, de baixo custo, baseada em *drone* e algoritmos de tomografia acústica da atmosfera.

## 2 Motivação

Em 2017 o grupo UFSCkite concluiu a primeira fase do projeto, em que foram desenvolvidos algoritmos de filtragem, estimação e controle de voo para o aerofólio cabeado, ainda sem geração de energia. Tais soluções foram validadas com sucesso em experimentos de campo, como pode ser visto nos vídeos em <<https://www.youtube.com/channel/UCUiIKg7KZcMLKLXhibkswxQ>>. Desde então passou-se à fase de construção de um protótipo de aerogerador do tipo *pumping kite* completo, os quais encontram-se atualmente em fase de preparação para início de testes de campo com geração de energia. O protótipo da unidade de solo em desenvolvimento, que é o objeto de trabalho em particular desse mestrado, é apresentado na Fig. 5.



Figura 5: Protótipo da unidade de solo em desenvolvimento no UFSCkite. Fonte: acervo UFSCkite.

## 2.1 Problema

Para o desenrolamento e enrolamento do cabo que liga a unidade de solo à de voo, uma das possibilidades é se controlar a velocidade do cabo (o que corresponde à velocidade angular da máquina elétrica). Este controle está implementado no inversor de frequência, que atua como o *driver* da máquina elétrica, em uma estrutura em cascata: a malha externa é de velocidade, enquanto a malha interna é de corrente/torque elétrico. Esta estratégia requer o ajuste rápido da referência de controle frente a possíveis rajadas de vento, dado que a força de tração varia com o quadrado da velocidade do vento. A outra possibilidade é se controlar a tração do cabo. Neste caso a velocidade do cabo passa a ser uma “consequência” da tração imposta pelo controlador e de outras grandezas que podem ser caracterizadas como perturbações, como a velocidade do vento e a eficiência aerodinâmica<sup>1</sup>

Dado a dificuldade em se ter uma estimativa rapidamente atualizada da velocidade do vento

---

<sup>1</sup>A eficiência aerodinâmica do aerofólio é ajustada pelo atuador de *de-power*, que está localizado dentro da unidade de voo.

na altura de operação do aerofólio, a estratégia de controle de tração apresenta-se como uma alternativa mais segura para a operação do aerogerador AWE, tendo em vista que picos de tração podem causar danos ao aerofólio flexível (feito de tecido sintético), arrebentar o cabo de tração ou danificar (“entortar”) componentes da estrutura mecânica da unidade de solo. Araujo (2017) propôs uma estratégia de controle de tração que utiliza como variável de controle a referência de velocidade, fornecida ao inversor de frequência. Entretanto essa estratégia não se mostrou viável na prática devido à restrições na taxa de variação da referência de velocidade, o que limita muito a capacidade de resposta (banda passante) do controle.

## 2.2 Solução proposta

Tendo em vista o problema exposto, a ideia com esse mestrado é desenvolver um controle realimentado da tração do cabo por meio da manipulação da referência de torque elétrico. A vantagem dessa estratégia está justamente na rapidez de controle, uma vez que a referência de torque elétrico pode ser variada muito mais rapidamente do que a referência de velocidade no inversor.

A força de tração será inferida a partir da leitura de duas células de carga que suportam uma polia em que o cabo de tração se apoia (contorna). O sinal analógico das células de carga é lido por um conversor analógico-digital de um microcomputador BeagleBone. Neste microcomputador estará implementado o controlador de tração, que receberá a referência de tração do operador ou de um algoritmo de otimização. O sinal de controle será enviado ao inversor de frequência por meio de um barramento digital (Modbus) ou por sinal analógico.

Para o projeto do controlador é necessário conhecer o modelo dinâmico do conjunto máquina elétrica, redutor mecânico e carretel. Nesse contexto, prevê-se o projeto de um filtro de Kalman para estimação dos parâmetros desconhecidos do modelo bem como para filtragem do sinal da tração e velocidade da máquina, a serem utilizados em uma estratégia de controle por realimentação de estado. Outra opção a ser considerada é o projeto de um controlador SISO em que apenas a tração é realimentada.

É importante destacar que, além dos aspectos teóricos de filtragem e estimação de variáveis, esse tema de mestrado envolve vários aspectos em áreas como eletrônica analógica e digital, programação de sistemas embarcados, informática industrial, redes de comunicação e máquinas elétricas, associados à implementação nos protótipos.

## 3 Objetivos

Tendo em vista o contexto apresentado, o objetivo geral deste mestrado é impulsionar o desenvolvimento dos protótipos de um aerogerador AWE no projeto UFSCkite por meio de contribuições teóricas e práticas. Para isso são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. projetar um filtro de Kalman para estimação de parâmetros do modelo dinâmico entre o torque elétrico aplicado pela máquina e a velocidade de desenrolamento do cabo;

2. projetar um controlador realimentado da força de tração do cabo;
3. implementar as soluções propostas, contribuindo para uma operação segura e prática (automatizada) do aerogerador AWE.

## 4 Cronograma

São estabelecidas as seguinte macroatividades para esse mestrado, planejadas segundo o cronograma da Tab. 1.

1. revisão bibliográfica sobre AWE e os tópicos listados na Seção 2. Essa revisão será registrada em documento que servirá para a qualificação e, posteriormente, para a dissertação de mestrado;
2. acompanhamento dos trabalhos e auxílio na supervisão *in loco* dos alunos de graduação no laboratório do UFSCkite;
3. participação em disciplinas de pós-graduação<sup>2</sup>, especialmente naquelas oferecidas pelo PPGEAS;
4. projeto, implementação e testes em laboratório do filtro de Kalman;
5. projeto, implementação e testes em laboratório do controle realimentado de tração;
6. elaboração da qualificação de mestrado (com defesa no final do período indicado);
7. execução de testes de campo com geração de energia para validação e aperfeiçoamento das soluções propostas;
8. publicação dos resultados em congresso ou periódico científico;
9. elaboração da dissertação de mestrado (com defesa ao final do período indicado).

## 5 Resultados Esperados

Espera-se que os resultados desta pesquisa contribuam para a formação do aluno como engenheiro, pesquisador e docente, bem como 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 científico como o *Control Engineering Practice*, da editora Elsevier, ou o *IEEE Transactions on Control Systems Technology*.

---

<sup>2</sup>No mestrado do PPGEAS são necessários 20 créditos cursados em disciplinas.



Atividade	bimestres do 1º ano						bimestres do 2º ano					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1: revisão bibliográfica				x	x	x						
2: acompanhamento de alunos				x	x	x	x	x	x	x	x	x
3: disciplinas		x	x	x	x	x						
4: filtro de Kalman				x								
5: controlador de tração					x	x						
6: qualificação de mestrado								x				
7: testes de campo e aperfeiçoamento						x	x	x	x	x	x	x
8: publicações							x	x	x	x	x	x
9: dissertação de mestrado											x	x

Tabela 1: Cronograma bimestral para os dois anos do mestrado, com começo (retroativo) em março (2º bimestre) de 2019.

## 6 Requisitos do aluno

É fundamental que o mestrando tenha conhecimentos sólidos em: (a) modelagem de sistemas dinâmicos; (b) *software* Matlab/Simulink; (c) observadores de estados (Filtro de Kalman e semelhantes); (d) sistemas embarcados; (e) eletrônica em geral; (f) máquinas e acionamentos elétricos; e (g) língua inglesa (bom domínio de leitura e escrita).

## Referências

ARAÚJO, H. *Controle da máquina elétrica de um aerogerador com aerofólio cabeado na configuração pumping kite*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2017. Disponível em: <<http://tede.ufsc.br/teses/PEAS0254-D.pdf>>.

De Lellis, M. *Airborne Wind Energy with Tethered Wings: Modeling, Analysis and Control*. Tese (Doutorado) — Federal University of Santa Catarina, Florianópolis (SC), Brazil, October 2016. (Marcelo De Lellis Costa de Oliveira). Disponível em: <<http://www.bu.ufsc.br/teses/PEAS0222-T.pdf>>.

SCHMEHL, R. (Ed.). *Airborne Wind Energy – Advances in Technology Development and Research*. 1. ed. [S.l.]: Springer Singapore, 2018. (Green Energy and Technology). Hardcover ISBN 978-981-10-1946-3.