



Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
Centro Tecnológico – CTC

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

Proposta de Mestrado:

Microgeração eólica embarcada para Aerogeradores com Aerofólios Cabeados

Orientador:

Prof. Alexandre Trofino Neto

Coorientador:

Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira

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.

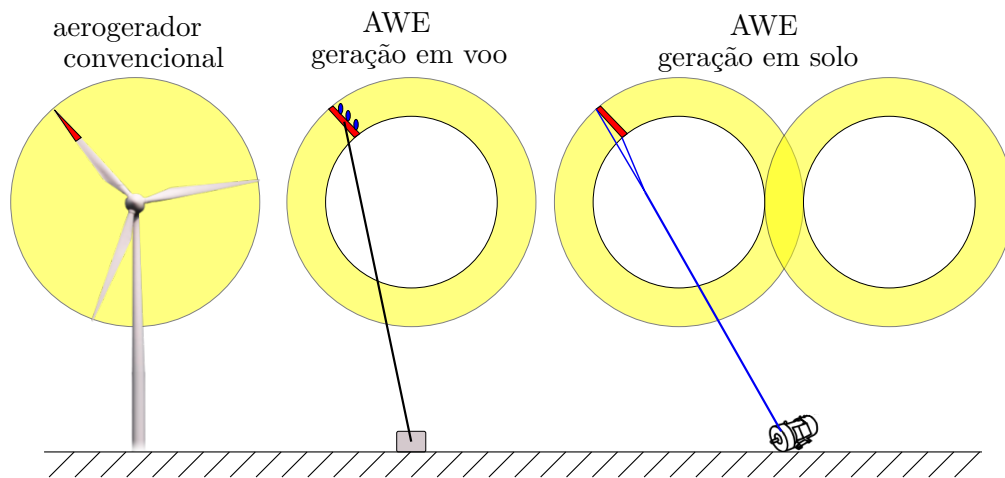


Figura 1: Comparação entre a tecnologia eólica convencional e a de aerofólios cabeados (AWE). Fonte: adaptado de (De Lellis, 2016).

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*.

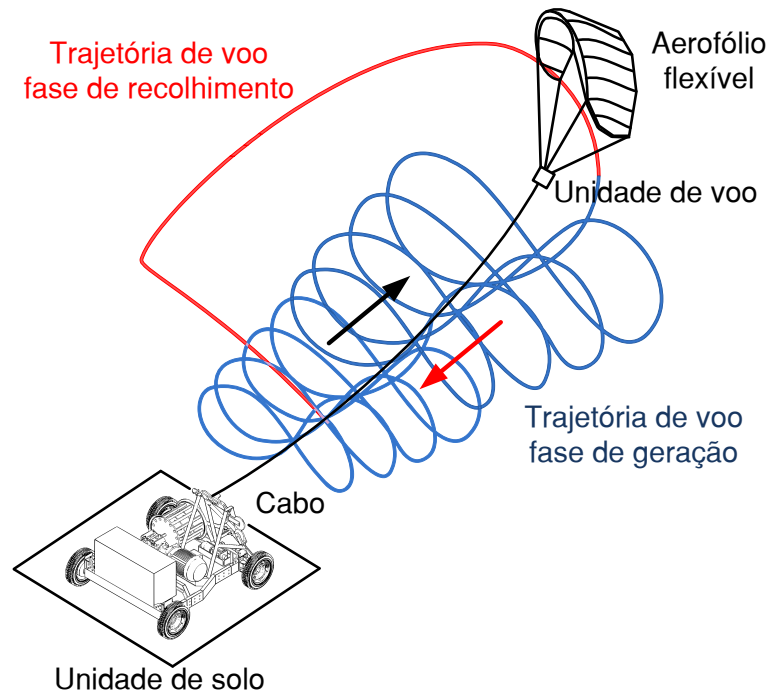


Figura 2: Conceito de aerogerador AWE do tipo *pumping kite*. Fonte: (ARAUJO, 2017).

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.

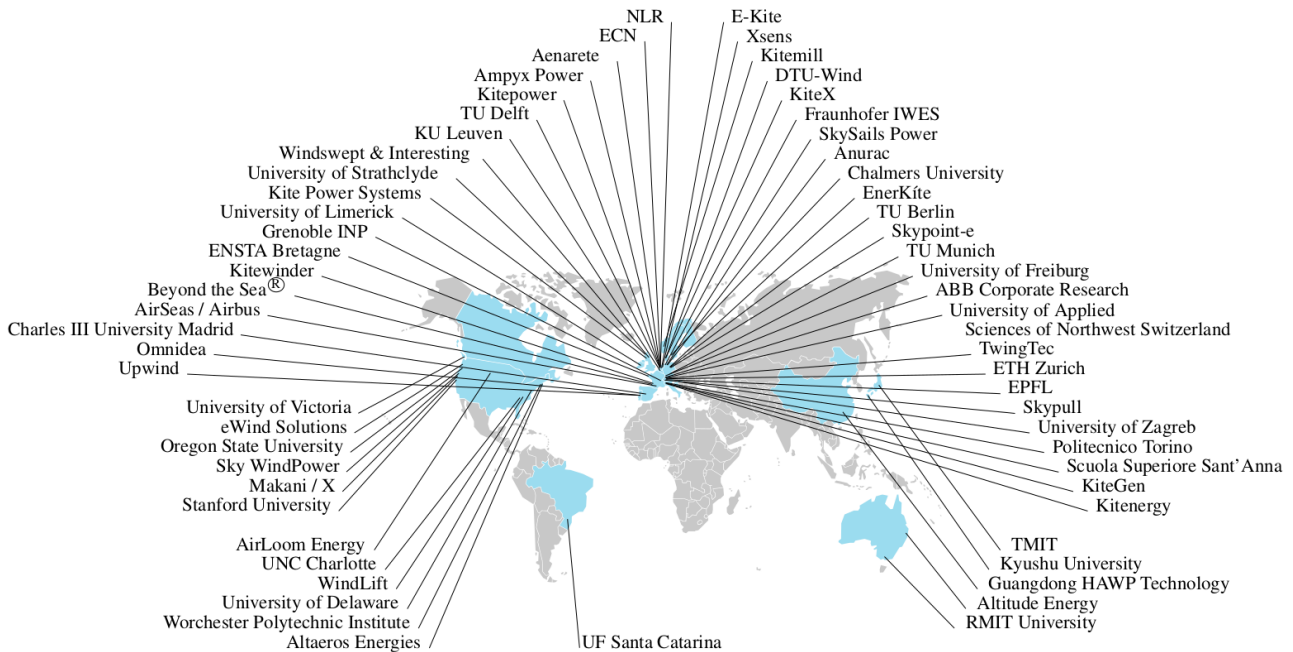


Figura 3: Instituições envolvidas com pesquisa e desenvolvimento em AWE. Fonte: (SCHMEHL, 2018).

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, apresentado na Fig. 5.
- **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, o qual encontra-se atualmente em fase de preparação para início de testes de campo com geração de energia.

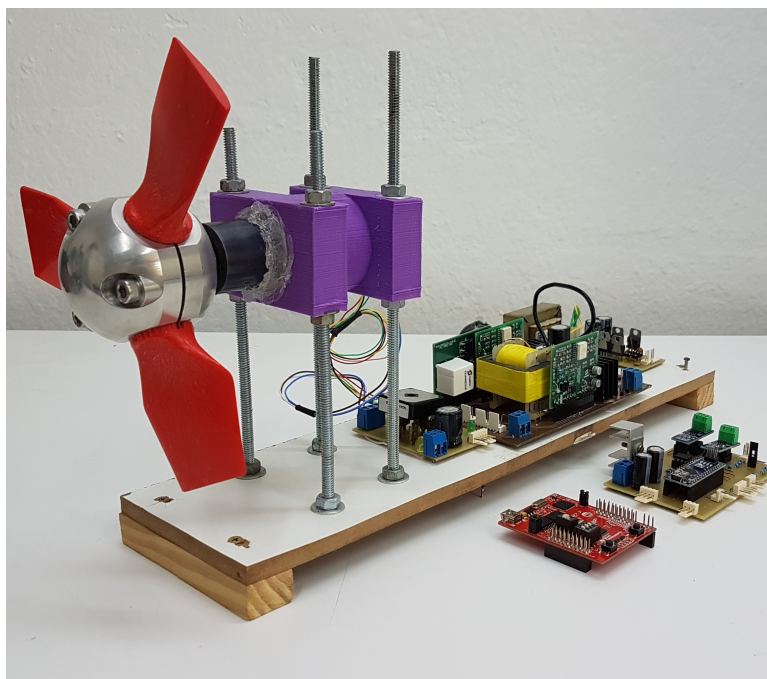


Figura 5: Protótipo da microturbina eólica da unidade de voo. Fonte: acervo UFSCkite.

2.1 Problema

Os dois servomotores para atuação sobre o aerofólio bem como o microcomputador, todos embarcados na unidade de voo, necessitam de alimentação elétrica. A unidade de voo contém um *pack* de baterias com o qual é possível operar o aerogerador durante um tempo estimado de duas horas, após o qual o aerofólio deveria ser pousado para troca das baterias. Isto, porém, provavelmente inviabilizaria a operação comercial do aerogerador, dados a redução da disponibilidade do sistema e o aumento de intervenções de operador humano (o que se reflete no custo de manutenção).

Na perspectiva de se permitir uma operação contínua do aerogerador, é necessário recarregar constantemente o *pack* de baterias. Para isto encontram-se na literatura de AWE duas alternativas. A primeira é transmitir a energia elétrica por meio de fios encapsulados pelo cabo de tração, a exemplo do que ocorre com os aerofólios cabeados com geração em voo. Esta alternativa tem a desvantagem de tornar o cabo de tração mais pesado e mais grosso, o que reduz a eficiência do aerogerador, além de encarecer o cabo e a unidade de solo, pois introduz a necessidade de contatos deslizantes na unidade de solo para a transmissão da energia para o cabo enrolado em um carretel que gira.

2.2 Solução proposta

Como os recursos do UFSCkite para desenvolvimento de protótipos são bastante limitados, optou-se por uma segunda alternativa, mais barata mas que também oferece os seus desafios tecnológicos. Trata-se da geração de eletricidade diretamente na unidade de voo por meio de uma microturbina eólica de eixo horizontal, a ser acoplada na parte superior da unidade de voo. Em condições nominais de operação do aerogerador, esta turbina deve ser capaz de gerar

aproximadamente 60 W, o que corresponde à estimativa da potência elétrica média consumida pela unidade de voo. Como o vento aparente que incide turbina é de cerca de 100 km/h, o diâmetro da turbina pode ser bastante reduzido (aproximadamente 12 cm), conforme pode ser visto na Fig. 5.

Um diagrama de blocos conceitual do sistema de geração *on-board* da unidade de voo é mostrado na Fig. 6. De maneira resumida, o funcionamento é o seguinte: o módulo de gerenciamento de carga decide se alimenta a carga com corrente proveniente do conversor *buck* conectado à ponte retificadora ou então a partir da energia armazenada no *pack* de baterias. Por outro lado, se a potência sendo gerada pela turbina/gerador é suficiente para alimentar plenamente a carga, o excedente é utilizado para recarregar as baterias. Caso as baterias já se encontrem plenamente carregadas, o excedente de potência é dissipado no resistor de proteção.

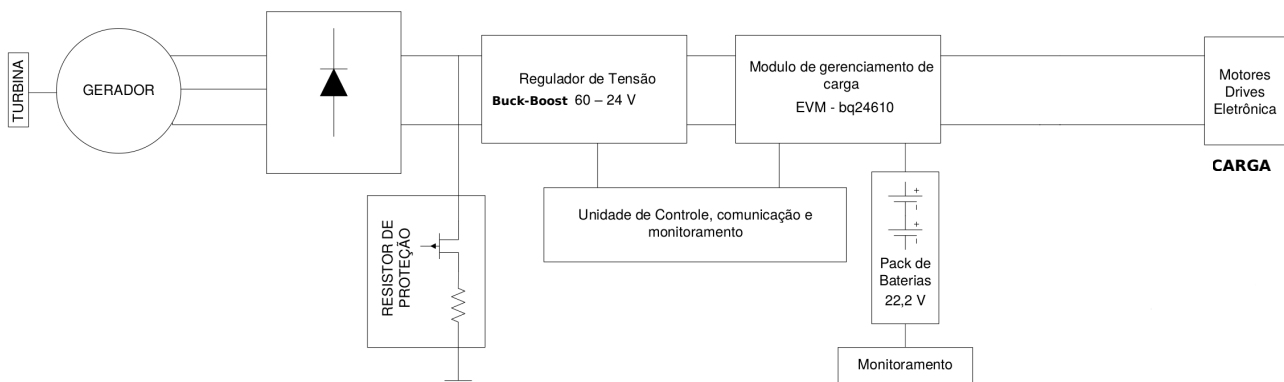


Figura 6: Diagrama de blocos do sistema de geração elétrica embarcado na unidade de voo. Fonte: adaptado de (ARAUJO, 2017).

Uma versão preliminar deste sistema de geração *on-board* já foi proposta em (ARAUJO, 2017), implementada em *hardware* e aguarda testes de túnel de vento, a serem realizados em laboratórios da Engenharia Mecânica da UFSC. Uma vez validado o sistema em laboratório, inciar-se-á a etapa de instalação na unidade de voo para então serem realizados testes de campo.

3 Objetivos

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

1. realizar a modelagem matemática e identificação da microturbina eólica;
2. projetar um controlador de velocidade para a microturbina, cuja referência será calculada buscando suprir a demanda de energia da unidade de voo;
3. implementar as soluções propostas em protótipo e validá-las com testes em laboratório e testes em campo.

4 Cronograma

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

1. revisão bibliográfica sobre AWE e o problema de geração embarcada, descrito na Seção 2. Essa revisão será registrada em documento que servirá para a qualificação e, posteriormente, para a dissertação de mestrado;
2. participação em disciplinas de pós-graduação¹, especialmente naquelas oferecidas pelo PPGEAS;
3. estudo sobre a modelagem, implementação em *hardware* e funcionamento do sistema de geração embarcado desenvolvido por Araujo (2017);
4. execução de testes em túnel de vento do protótipo de geração embarcada em malha aberta e malha fechada;
5. execução de testes de campo para validação e aperfeiçoamento das soluções propostas;
6. publicação dos resultados em congresso ou periódico científico;
7. elaboração da dissertação de mestrado (com defesa ao final do período indicado).

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							
2: disciplinas		x	x	x	x	x						
3: estudo do protótipo implementado				x	x							
4: testes em túnel de vento					x	x	x					
5: testes de campo e aperfeiçoamento								x	x	x	x	x
6: publicações							x	x	x	x	x	x
7: dissertação de mestrado											x	x

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

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*.

¹No mestrado do PPGEAS são necessários 20 créditos cursados em disciplinas.

6 Requisitos do aluno

É fundamental que o mestrando tenha conhecimentos sólidos em: (a) modelagem de sistemas dinâmicos; (b) *software* Matlab/Simulink; (c) programação de sistemas embarcados e FPGA; (d) eletrônica em geral; (e) máquinas e acionamentos elétricos; e (f) 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, Florianopolis (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.