

PRH-ANP/MCT nº

## PLANO DE TRABALHO DE PESQUISA

1 – IDENTIFICAÇÃO	
Nome do Bolsista Guilherme Pimenta da Silva	Matrícula 117154235
Título do Programa PRH-18	
Título do Curso / Especialização Engenharia Naval e Oceânica	
Instituição Universidade Federal do Rio de Janeiro	Sigla UFRJ
Nome do Orientador (1) Segen F. Estefen	Nome do Orientador (2) John H. Chujutalli
2 – TÍTULO DO TRABALHO	
Integridade Estrutural de Pás de Turbinas Eólicas Offshore	
3 – INTRODUÇÃO / OBJETIVO (no máximo 1 página)	
<p>Dentre as diversas categorias de energias renováveis, a energia eólica é a que apresenta o maior nível de maturação tecnológica e de disponibilidade de recursos. Apresentando diversas vantagens sobre a prática <i>onshore</i>, a exploração <i>offshore</i> se beneficia, mesmo apresentando elevados custos operacionais, à medida que a região no oceano não apresenta barreiras físicas para o deslocamento do vento e soluciona as questões de poluições sonora e visual e a escassez de território disponível em. Com o objetivo de reduzir os custos associados a exploração da energia eólica e torná-la mais econômica, a indústria eólica offshore vem desenvolvendo rotores maiores capazes de aumentar a geração de energia, acompanhados de um menor peso estrutural, em águas profundas e afastadas da costa, o que é capaz de possibilitar um menor número de turbinas gerando uma grande quantidade de energia e tornar o projeto mais lucrativo. Entretanto, rotores maiores impõem desafios aeroelásticos mais complexos à integridade estrutural das pás visto que se tornam mais vulneráveis aos carregamentos ambientais que podem causar grandes deflexões e danos, levando a uma queda significativa na capacidade de resistir às cargas aplicadas durante a sua vida útil.</p> <p>Dessa forma, se faz imprescindível a existência de um método de análise preciso e acurado que consiga prever a resposta estrutural das pás da turbina eólica quando interagindo com os carregamentos ambientais ao longo da sua vida útil para que as possíveis tensões, deflexões e deformações dessas pás sejam consideradas no projeto e nas análises de desempenho.</p> <p>Portanto, o principal objetivo da pesquisa é realizar análises, pelo método dos elementos finitos com a utilização do software ABAQUS, das pás de turbinas eólicas offshore, a partir de carregamentos oriundos de previsões ambientais no local de instalação de parques eólicos. E, com base nos resultados obtidos para diferentes condições ambientais, avaliar a resistência última das pás. Essas análises são relevantes na definição do layout de parques eólicos e no planejamento de pontos sensíveis em operação e manutenção.</p> <p>O desenvolvimento da pesquisa se dará no âmbito do Grupo de Energia Renovável do Oceano (GERO) do Laboratório de Tecnologia Submarina da COPPE, UFRJ. A interação do aluno-pesquisador com as atividades em andamento do Grupo propiciará o intercâmbio de informações que serão fundamentais para o andamento desse projeto como a possibilidade de utilização dos perfis de ventos estimados em estudos da previsão ambiental.</p>	
4 – RELEVÂNCIA DO TEMA / JUSTIFICATIVA (no máximo 1 página)	
A relevância nas análises da resistência última das pás de grande porte de turbinas eólicas offshore está associada à importância científica, econômica e tecnológica da investigação da complexidade dos procedimentos de projeto de pás de grande escala associados à busca de estruturas cada vez mais leves, deixando-as suscetíveis a desafios aeroelásticos que, se não forem devidamente compreendidos, podem levar	

ao colapso global do sistema eólico. Dessa forma, fica evidente a relevância do tema para a implementação de técnicas mais rebuscadas no planejamento dos procedimentos de operação e manutenção dos parques eólicos offshore. Além disso, o presente projeto de pesquisa tem relevância na formação de recursos humanos, a medida que proporciona e continuará proporcionando, ao aluno-pesquisador, a fundamentação teórica e o aprofundamento nesse tipo de mercado que vem expandindo, tanto no campo nacional quanto internacional, e gerando oportunidades para a ampliação do conhecimento em métodos numéricos.

#### **5 – ESTADO DA ARTE E METODOLOGIA (no máximo 3 páginas)**

Falhas nos componentes do sistema eólico são frequentemente associadas com significantes perdas financeiras e a situação é agravada quando se trata das pás de turbinas eólicas. Na ótica *offshore* os desafios de operação e manutenção são ainda maiores se comparada com a tecnologia *onshore* devido à complexidade no acesso aos parques eólicos. Dessa forma, para que o aproveitamento da energia eólica *offshore* seja bem sucedido, um monitoramento da integridade estrutural, visando o aumento da segurança e a redução de perdas financeiras devido a falhas das pás, se mostra necessário. Nesse sentido, Yang et al. (2016) colaboram para a discussão quando investiga os prós e contras das técnicas de monitoramento da saúde estrutural (do inglês, *Structural Health Monitoring*) existentes e segue analisando novas técnicas que são efetivas tanto na detecção do dano quanto na localização da falha. O trabalho se desenrola mostrando que tanto análises de vibração quanto de emissão de acústica são aplicáveis para desenvolver uma investigação da localização de danos nas pás da turbina eólica. Contudo, sua confiabilidade pode ser afetada por variações no carregamento externo. Além disso, informa que o promissor monitoramento de saúde estrutural baseado na transmissibilidade de funções correspondentes à resposta das frequências, verificada a partir de sensores de tensão, é confiável tanto em detecção de danos quanto na localização das falhas.

Abordando o comportamento das pás de turbinas eólicas após receber cargas de impacto na sua estrutura durante o procedimento de instalação, Verma et al. (2019) confirmam que os movimentos causados pelas ondas do mar trazem complicações às atividades de instalação offshore das turbinas eólicas. As cargas de impacto nas pás de materiais compósitos são modos de falha críticos capazes de afetar a integridade estrutural do sistema eólico. Portanto, o trabalho desenvolvido produz simulações numéricas no software Abaqus para a situação em que o *trailing edge* de uma pá colide com a torre, propiciando uma avaliação dos danos causados pela carga dinâmica de impacto. Os resultados mostram que uma faixa de 7 a 20% da energia de impacto é absorvida como dano na pá, enquanto que o restante é dissipado em forma de movimentos de corpo rígido na pá após o impacto.

No campo da análise da integridade estrutural e da avaliação de danos em pás de grande porte sob carregamentos extremos, tem-se a contribuição recente de Ullah et al. (2020) que, utilizando o procedimento de análise por elementos finitos, com o aporte do software ANSYS, pôde desenvolver simulações tridimensionais com o objetivo de investigar as deformações das pás de materiais compósitos e regiões com altas cargas que poderão conduzir a possíveis modos de falha ao longo da vida útil da estrutura. Os resultados indicaram que as cargas compressivas submetidas à superfície de sucção das pás são responsáveis pela flambagem local, investigada posteriormente a partir de uma análise linear de flambagem, que proporciona o descolamento entre a superfície da pá e o *spar cap* e representa o modo de falha inicial que pode levar ao colapso progressivo da estrutura.

Sob o mesmo escopo, Boudounit et al. (2019) aprofundam a discussão sobre a integridade estrutural e o desempenho mecânico de uma pá de turbina eólica exposta a carregamentos excessivos fundamentado na teoria bidimensional BEM (*Blade Element Momentum*). Com o objetivo principal de identificar e prever regiões sensíveis a danos e falhas e, também, de avaliar o potencial de materiais compósitos, como as fibras de vidro e de carbono, na redução do peso do rotor em contrapartida ao aumento da rigidez da estrutura, a pesquisa desenvolvida contribui para a diminuição dos riscos de falha estrutural das pás, maximizando a eficiência aerodinâmica e reduzindo os custos totais de produção.

Em outra contribuição ao tema, Boudounit et al. (2019) investigam o projeto estrutural de uma pá de turbina eólica *offshore* feita com material compósito e possuindo 48 metros de comprimento. Nesse estudo, as cargas de projeto foram determinadas a partir de vários casos de carregamento (aerodinâmico, centrífugo e inercial), indicados em especificações internacionais para o sistema de conversão de energia eólica e os estudos paramétricos foram realizados pelo software de elementos finitos Abaqus com o objetivo de determinar as regiões mais sensíveis a danos e falhas, conhecer o complexo comportamento estrutural e propor uma configuração estrutural particular que possa resistir a condições de carregamento extremo.

Propondo soluções para o reforço estrutural das pás de turbinas eólicas, Raman et al. (2020) implementaram simulações numéricas, com o software Abaqus, para prever a distribuição de cargas aplicada sobre a pá e para determinar regiões com alta concentração de cargas. Considerando flexão e torsão acopladas com uma condição estática de carregamento na direção *flapwise*, a pesquisa indica que danos estruturais em zonas críticas variam de acordo com a orientação e a rigidez das fibras por conta da natureza ortotrópica do compósito e leva a cenários e técnicas existentes que propiciam soluções para o projeto das pás de turbinas eólicas. Por exemplo, a seção da raiz e do *trailing edge* são determinadas como as regiões mais críticas da pá e os resultados apontam que isso pode ser tratado ao se modificar a rigidez da estrutura aumentando o número de camadas do compósito ou ajustando a técnica de ligação para prevenir a falha do *trailing edge*.

Considerando a discussão iniciada nos parágrafos acima, a metodologia a ser utilizada abordará uma profunda revisão bibliográfica sobre o estudo do comportamento estrutural das pás de turbinas eólicas *offshore* confeccionadas com materiais compósitos, especialmente as fibras de vidro e de carbono, com foco no estudo da resistência última dessa estrutura. Fundamentado pela base teórica disponível sobre o tema, o pesquisador irá considerar diversas situações de carregamento, oriundas de modelo atmosférico de previsão dos fenômenos ambientais de médio prazo, para, utilizando a modelagem por elementos finitos, definir os níveis de tensões, deformações e deflexões das pás das turbinas eólicas. Inicialmente, serão definidas as condições ambientais associadas às cargas atuantes sobre a estrutura e serão realizados estudos de sensibilidade de malhas de elementos finitos. Em seguida, simulações computacionais no software comercial ABAQUS (2011) serão realizadas para determinar tensões, deflexões e deformações atuantes sobre as pás da turbina eólica. Tais análises, sob diferentes condições ambientais, possibilitarão identificar eventuais modos de falha estrutural e recomendar consequentes ações nas fases de operação e manutenção dos parques eólicos.

#### **6 – ETAPAS (no máximo 2 páginas)**

As etapas previstas na pesquisa estão listadas abaixo.

1. Revisão bibliográfica sobre integridade estrutural de pás de turbinas eólicas offshore, com foco em análises de resistência última.

Essa etapa abordará uma investigação detalhada da bibliografia voltada para a integridade estrutural das pás de turbinas eólicas offshore, identificando seus modos de falha característicos.

2. Definição da estrutura da pá e dos carregamentos ambientais.

A partir do modelo atmosférico de previsão dos fenômenos ambientais de médio prazo, resultado da interação com os pesquisadores do Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS) – Grupo GERO, e da revisão bibliográfica feita, será definida uma estrutura da pá a qual será baseada em resultados numéricos e em testes em escala real consagrados na literatura.

3. Estudo de Sensibilidade de Malha de Elementos Finitos

O estudo de sensibilidade de malha será realizado a partir de resultados numérico-experimentais disponíveis na literatura e abordará os procedimentos de verificação e validação para a posterior realização das simulações computacionais.

4. Simulações numéricas da resistência última da pá

Com o aporte computacional proveniente do software ABAQUS, o método dos elementos finitos será utilizado para análises das tensões, deflexões e deformações atuantes nas pás sob diferentes carregamentos considerados.

5. Análises dos resultados numéricos e definição dos modos de falha.

Com os resultados numéricos obtidos da etapa anterior, os possíveis modos de falha das pás serão identificados e avaliados para elaboração de resultados conclusivos que auxiliarão os procedimentos de operação e manutenção das turbinas eólicas offshore.

6. Artigos Técnicos e Relatório Final.

Artigos técnicos serão realizados ao longo da pesquisa e o período final será de consolidação e preparação do relatório final.

**7 – CRONOGRAMA DE TRABALHO (no máximo 1 página)**

**Cronograma:** O projeto será realizado em 24 meses.

Etapas	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Revisão Bibliográfica								
Definição da estrutura da pá e dos carregamentos ambientais								
Estudo de Sensibilidade da Malha de Elem. Finitos								
Simulações Numéricas da Resistência última da Pá								
Análises dos resultados numéricos e definição dos modos de falha								
Artigos Técnicos e Relatório Final								

**8 – DISCIPLINAS DA ESPECIALIZAÇÃO (listar as disciplinas complementares obrigatórias para o PRH-ANP que pretende cursar)**

EEN667 – Aplic Dinâmicas Fluidos Comput  
 EEN663 – Tec Exp em Hidrodinâmica  
 EEN597 – Tópicos Especiais em Eng Naval  
 EEN604 – Tecnologia Sistemas Oceânicos III  
 EEN615 – Tec Mod Est Nav e Pla Offshore  
 EEN588 – Fund e Técnicas de Medição

**9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Abaqus, G. (2011). Abaqus 6.11. *Dassault Systemes Simulia Corp Providence, RI, USA.*

Yang, Wenxian, Peng, Zhike, Wei, Kexiang, Tian, Wenye. (2016). Structural health monitoring of composite wind turbine blades: challenges, issues and potential solutions. *The Institution of Engineering and Technology 11: 411-416.*

Verma, Amrit Shankar, Vedvik, Nils Petter, Gao, Zhen. (2019). A comprehensive numerical investigation of the impact behaviour of an offshore wind turbine blade due to impact loads during installation. *Ocean Engineering 172: 127-145.*

Ullah, Himayat, Ullah, Baseer, Silberschmidt, Vladim V. (2020). Structural integrity analysis and damage assessment of a long composite wind turbine blade under extreme loading. *Composite Structures 246.*

Boudounit, Hicham, Tarfaoui, Mostapha, Saifaoui, Dennoun, Nachtane, Mourad. (2019). Structural analysis of offshore wind turbine blades using finite element method. *Wind Engineering: 1-13.*

Boudonit, H., Tarfaout, M., Saifaoui, D. (2019). Structural design and analysis of a 5 MW offshore wind turbine blades under critical aerodynamic loads. *14ª Congrès de Mécanique, Rabat.*

Raman, Venkadesh, Drissi-Habti, Mossef, Guillaumat, Laurent, Khadhour, Aghihad. (2020). Numerical simulation analysis as a tool to identify areas of weakness in a turbine wind-blade and solutions for their reinforcement. *Composites Part B: Engineering, Elsevier: 23-29.*

PRH-ANP/MCT nº

**10 – OBSERVAÇÕES PERTINENTES (por exemplo recursos financeiros envolvidos etc)**

Local Rio de Janeiro	Data 04 / 11 / 2020
-------------------------	------------------------