

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE
AEROGERADORES**

HENRIQUE ATAIDE NERY DE CASTRO FILHO

MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE
AEROGERADORES**

HENRIQUE ATAIDE NERY DE CASTRO FILHO

ORIENTADOR: Prof. José Luís Vital de Brito, Dsc.

COORIENTADORA: Prof. Suzana Moreira Avila, Dsc.

EXAMINADOR INTERNO: Prof. Graciela Nora Doz de Carvalho, Dsc.

EXAMINADOR EXTERNO: Prof. Marcus Vinicius Girão de Moraes, Dr. Univ.

PUBLICAÇÃO: E.DM - 13A/19

BRASÍLIA/DF: Julho/2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE
AEROGERADORES

HENRIQUE ATAIDE NERY DE CASTRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. José Luís Vital de Brito, DSc. (ENC -UNB)
(Orientador)

Prof. Graciela Nora Doz de Carvalho, DSc. (ENC -UNB)
(Examinadora Interna)

Prof. Marcus Vinicius Girão de Moraes, Dr. Univ. (ENM -UNB)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 08 DE AGOSTO DE 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

CASTRO FILHO, HENRIQUE ATAIDE NERY DE

Estudo do comportamento dinâmico de aerogeradores. [Distrito Federal] 2019. xvi, 117p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2019).
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Turbinas Eólicas

2. Condições Operacionais

3. ISE

4. Velocidade do rotor

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Mestre)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CASTRO FILHO, H.A. N. de (2010) Estudo do comportamento dinâmico de aerogeradores. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM – 13A/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Henrique Ataide Nery de Castro Filho

TÍTULO: Estudo do comportamento dinâmico de aerogeradores.

GRAU: Mestre

ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Henrique Ataide Nery de Castro Filho
SQN 412, Bloco G, Apartamento 201 - Asa Norte
CEP: 70847-110 Brasília/DF - Brasil
e-mail: hcastro3009@gmail.com

AGRADECIMENTOS

“Quando abro a porta de uma nova descoberta já encontro Deus lá dentro.” (Albert Einstein)

Início os meus agradecimentos com uma frase de Albert Einstein que resume bem não só a parte científica do que foi esse mestrado mas também minha vida pessoal. Não posso dizer que esses dois anos e 3 meses foram fáceis, longe disso. Mas sei que mesmo nas dificuldades Deus está comigo e Ele preparou esse caminho para e trilhar. Portanto, não poderia prestar meus agradecimentos a outro que não Deus. É Ele que me sustenta, me ama e me concede pessoas para auxiliar na jornada; e durante esse período na UnB não foi diferente. Pessoas maravilhosas agora fazem parte da linha da minha existência e outras tantas reforçaram ainda mais a importância e amor que eu tenho por elas e vice-versa.

Agradeço aos meus pais, Valdiné e Henrique, e a minha irmã, Karla Patrícia, com todo o amor que há em mim e que transborda para além do entendimento. Que grande família que Deus me concedeu. Vocês são exemplo para mim, são força e vigor que não consigo explicar. Cada palavra, abraço, lembrança que vem de vocês traz uma paz e ao mesmo tempo força e renovo que não se entende se sente. Espero cada dia mais trazer orgulho a vocês e retribuir cada esforço que fizeram e fazem por mim. Agradeço a Deus também, por ter me concedido uma companheira que me completa e auxilia; Bruna Carolina, muito obrigado meu amor.

Agradeço aos meus amigos. A meu amigo de longa data, Joao Paulo, por me acolher tantas vezes em sua residência, pelas conversas e conselhos, mas principalmente e simplesmente por seu meu amigo. Agradeço também a meu amigo e primo em Brasília, Aldegundes, obrigado pela força e acolhimento. Na UnB também pude encontrar amizades sinceras daquelas que perduram por toda vida, mesmo que muitas não farão mais parte do meu convívio diário. Muito obrigado meus amigos que entraram nessa jornada junto comigo, obrigado Luciano (lulu), Diego (dieguito), Nasser, Rodolfo Palhares, Luis Vinícius e Thiago Arnaud. Agradeço também aos companheiros que mesmo não sendo colegas de turma, me escolheram como amigo, obrigado Jerfson, Iarly, Wilber, Nataniel, Gelson, Wilson, Juliana, Renan, Pedro, Amir Mahdi, Matheus Galvão, Gabriel e John Kennedy, vocês são demais.

Por fim agradeço aos meus orientadores Brito e Suzana, obrigado pelo compartilhamento de conhecimento e por toda atenção que tiveram comigo.

“E tudo quanto fizerdes, fazei-o de todo o coração, como ao Senhor”. Colossenses 3:23

RESUMO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE AEROGERADORES

Autor: Henrique Ataíde Nery de Castro Filho

Orientador: Prof. José Luís Vital de Brito, PhD

Co-orientadora: Prof. Suzana Moreira Avila, PhD

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, julho de 2019

Estruturas especiais, tais como turbinas eólicas, possuem características e apresentam comportamento significativamente diferente das estruturas convencionais de engenharia civil. Turbinas eólicas em geral são estruturas flexíveis e suscetíveis a deslocamentos consideráveis devido a vibrações externas. Assim, é de importância significativa analisar o comportamento dinâmico dessas estruturas. Considerando isso, o presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho dinâmico de turbinas eólicas através de dois modelos aproximados, investigando três condições diferentes e como cada uma delas afetará os resultados. Os três aspectos estudados são a influência da condição operacional (estacionada e rotativa), a influência do ISE e a influência da velocidade do rotor. A turbina eólica NREL 5MW será a fonte de propriedades para a torre, a nacela e o rotor. Os modelos utilizam multi-graus de liberdade para representar uma turbina eólica onshore de eixos horizontais; além disso, a abordagem Euler-Lagrangiana é usada para processar a análise dinâmica. O primeiro modelo foi desenvolvido usando pás rotativas modeladas como vigas contínuas. Todo o modelo tem 8 graus de liberdade. As pás são analisadas como um sistema de dois graus de liberdade, isto é, é possível vibrar nas direções no plano e fora do plano. Elas estão conectadas no centro da torre-nacela representada por uma mola de massa correspondente a um sistema de dois graus de liberdade, isto é, também pode ter vibrações nas direções no plano e fora do plano. O segundo modelo tem as mesmas características do primeiro; no

entanto, é incluído nele uma fundação modelada como uma mola com rigidez rotacional bidirecional. Desta forma, é possível, a partir deste modelo, estudar a interação solo-estrutura (ISE). A rigidez do solo e as propriedades de amortecimento foram adquiridas a partir dos padrões da DNV/Risø e são usados como comparação. Uma carga de vento e um terremoto são usados como fonte de vibração para os modelos. O objetivo principal, então, é avaliar o impacto de três condições diferentes através da resposta dinâmica obtida dos dois modelos. A partir dos resultados, percebe-se que as respostas da turbina eólica na condição de operação são muito maiores do que aquelas na condição estacionada; A ISE pode afetar consideravelmente as respostas da torre; no entanto, não tem um efeito significativo nas vibrações que ocorrem no plano de rotação das pás. Por fim, percebe-se que a amplitude da resposta aumenta com a velocidade do rotor, em geral.

Palavras-chave: turbina eólica onshore; condição de operação; ISE; velocidade do rotor.

Abstract

Special structures, such as wind turbines, have characteristics and exhibit significantly different behavior than conventional civil engineering structures. Wind turbines are generally flexible structures and susceptible to considerable displacement due to external vibrations. Thus, it is of significant importance to analyze the dynamic behavior of these structures. Considering this, the present study aims to evaluate the dynamic performance of wind turbines through two approximate models, investigating three different conditions and how each one will affect the results. The three studied aspects are the influence of the operational condition (parked and rotating), the influence of SSI and the influence of rotor speed. The NREL 5MW wind turbine will be the source of tower, nacelle and rotor properties. The models use multi-degrees of freedom to represent an onshore wind turbine of horizontal axes; in addition, the Euler-Lagrangian approach is used to process dynamic analysis. The first model was developed using rotary blades modeled as continuous beams. The whole model has 8 degrees of freedom. The blades are analyzed as a system of two degrees of freedom, that is, it is possible to vibrate in the directions in the plane and out of the plane. They are connected in the center of the tower-nacelle represented by a spring of mass corresponding to a system of two degrees of freedom, that is to say, also can have vibrations in the directions in the plane and outside the plane. The second model has the same characteristics as the first; however, a foundation shaped like a spring with bi-directional rotational stiffness is included therein. In this way, it is possible, from this model, to study the soil-structure interaction (SSI). Soil stiffness and damping properties were acquired from the DNV/Risø standards and are used as a comparison. A wind load and an earthquake are used as a source of vibration for the models. The main objective, then, is to evaluate the impact of three different conditions through the dynamic response obtained from the two models. From the results, it can be seen that the responses of the wind turbine in the operating condition are much larger than those in the parked condition; SSI can greatly affect tower responses; however, does not have a significant effect on the vibrations occurring in the plane of rotation of the blades. Finally, it is realized that the amplitude of the response increases with the velocity of the rotor, in general.

Keywords: onshore wind turbine; operating condition; SSI; velocity of the rotor.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	5
1.3	METODOLOGIA	6
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	7
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	9
2.1	BREVE HISTÓRICO SOBRE AEROGERADORES.....	9
2.2	ANÁLISE DINÂMICA DE AEROGERADORES	11
2.3	CONDIÇÕES OPERACIONAIS E INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA.....	14
3	FUNCIONAMENTO BÁSICO DE UM AEROGERADOR E AS CARGAS ENVOLVIDAS	17
3.1	Funcionamento básico de um aerogerador e suas características relevantes para este estudo 17	
3.1.1	Energia contida em uma rajada de vento.....	17
3.1.2	Simple descrição do funcionamento de uma turbina	19
3.2	Carregamentos.....	21
3.3	Carregamentos nas pás do rotor	23
3.4	Características das cargas analisadas separadamente.....	25
3.4.1	Cargas Gravitacionais e Inerciais	26
3.4.2	Cargas Gravitacionais.....	26
3.4.3	Carga centrífuga	27
3.4.4	Cargas giroscópicas	27
3.5	Normas nacionais e internacionais.....	28
4	MODELO.....	31

4.1	Modelo - Aerogerador.....	31
4.2	Propriedades.....	35
4.3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.....	36
4.3.1	ENERGIA POTENCIAL	37
4.3.2	ENERGIA CINÉTICA	48
4.3.3	EQUAÇÃO DO MOVIMENTO PARA CADA G.L.....	51
4.3.4	COMPARAÇÃO DO MODELO COM DADOS DA LITERATURA A PARTIR DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS	52
5	INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA (ISE).....	57
6	CARREGAMENTOS.....	65
6.1	Carregamento do vento	65
6.2	Carregamento devido ao sismo – “El Centro”	69
7	RESULTADOS.....	73
7.1	Influência da condição operacional.....	73
7.2	Influência da ISE.....	78
7.3	Influência da velocidade do rotor.....	82
8	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	86
8.1	Conclusões	86
8.2	Sugestões para trabalhos futuros	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	Anexo A	93
	Apêndice A.....	94
	Apêndice B.....	97

LISTA DE TABELAS

TABELA 4-1: PROPRIEDADES DO MODELO. FONTE: ZUO ET AL. (2018).....	36
TABELA 4-2: COMPARAÇÃO DO MODELO PELA FREQUÊNCIA NATURAL.....	54
TABELA 5-1: LISTA DE SOLOS ANALISADOS E SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS.....	62
TABELA 5-2: MÓDULO CISALHANTE E VELOCIDADE DE ONDA DOS SOLOS.	63
TABELA 5-3: COEFICIENTES DE IMPEDÂNCIA PARA OS DIFERENTES TIPOS DE SOLO.....	64
TABELA 7-1: DESLOCAMENTO MÁXIMO DA TORRE CONSIDERANDO A ISE.....	80
TABELA 7-2: DESLOCAMENTO MÁXIMO DA PÁ 1 NAS DUAS DIREÇÕES DE ESTUDO CONSIDERANDO A ISE.....	81

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-1 - PRODUÇÃO DE ENERGIA EÓLICA MUNDIAL ENTRE 2001 E 2017. FONTE: GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, (2018).	1
FIGURA 1-2 - 10 MAIORES CAPACIDADES INSTALADAS EM 2017. FONTE: GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, (2018).....	2
FIGURA 1-3: EXEMPLO DE AEROGERADOR. FONTE: GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, (2018).	3
FIGURA 1-4: LOCALIZAÇÃO DA NACELE. FONTE: FEIJÓ <i>ET AL.</i> , (2010).	3
FIGURA 3-1: ENERGIA DE UMA RAJADA. FONTE: HAU, 2013 (ADAPTADO).....	17
FIGURA 3-2: PROJEÇÃO DAS FORÇAS NAS PÁS. FONTE: HAU, 2013 (ADAPTADO).	19
FIGURA 3-3: CARGAS ATUANTES NO ROTOR DAS PÁS. FONTE: LETCHER (2017)	24
FIGURA 3-4: FORÇA GIROSCÓPICA. FONTE: TENG <i>ET AL.</i> (2015).....	28
FIGURA 4-1: MODELO DE 8 GRAUS DE LIBERDADE E FUNDAÇÃO ENGASTADA. FONTE: FITZGUALD E BASU (2016) ADAPTADO.	32
FIGURA 4-2: MODELO AEROGERADOR CONSIDERANDO A ISE. FONTE: FITZGUALD E BASU (2016) ADAPTADO.	33
FIGURA 4-3: FUNÇÃO DO PRIMEIRO MODO DE VIBRAÇÃO DA PÁ PARA AS DUAS DIREÇÕES.....	35
FIGURA 4-4 - DEFLEXÃO DE UMA VIGA AO LONGO DO SEU COMPRIMENTO.....	38
FIGURA 4-5 - CURVA DE DEFLEXÃO DE UMA VIGA.	38
FIGURA 4-6 - RAIOS DE CURVATURA.....	40
FIGURA 4-7 - RELAÇÃO LINEAR ENTRE O MOMENTO E O ÂNGULO.	41
FIGURA 4-8 - FORÇA CENTRÍFUGA.....	42
FIGURA 4-9 - FORÇA CENTRÍFUGA AGINDO NA PÁ. FONTE: FITZGUALD E BASU (2016) ADAPTADO.	44
FIGURA 4-10 - DECOMPOSIÇÃO DA FORÇA GRAVITACIONAL.	45

FIGURA 4-11 - ESQUEMATIZAÇÃO DO MODELO DO AEROGERADOR. FONTE: FITZGUALD E BASU (2016) ADAPTADO.	47
FIGURA 4-12 - COMPONENTE VETORIAL.	49
FIGURA 4-13 – COMPARAÇÃO DA PRIMEIRA FORMA MODAL DA PÁ (FORA-DO-PLANO)	55
FIGURA 4-14 – COMPARAÇÃO DA PRIMEIRA FORMA MODAL DA PÁ (NO-PLANO)	55
FIGURA 4-15 – COMPARAÇÃO DA PRIMEIRA FORMA MODAL DA TORRE (FORA-DO-PLANO)	55
FIGURA 4-16 – COMPARAÇÃO DA PRIMEIRA FORMA MODAL DA TORRE (NO-PLANO)	56
FIGURA 5-1 - MODELO DA INTERAÇÃO CINEMÁTICA SOLO-ESTRUTURA FONTE WOLF, 1988 (ADAPTADO).	58
FIGURA 5-2 - MODELO DA INTERAÇÃO INERCIAL.	58
FIGURA 5-3 - MODELO DO AEROGERADOR – SISTEMA SIMPLIFICADO DO EFEITO SÍSMICO.	61
FIGURA 6-1: CARGA DE VENTO PARA DIREÇÃO FORA-DO-PLANO (VELOCIDADE MÉDIA DE 20 M/S).....	69
FIGURA 6-2 SISTEMA DE UM GRAU DE LIBERDADE COM EXCITAÇÃO NA BASE. FONTE: (CLOUGH, 2003)	70
FIGURA 6-3: SISMO INSERIDO NO MODELO.	72
FIGURA 7-1: DESLOCAMENTO DO TOPO TORRE PELO TEMPO.	73
FIGURA 7-2: PSD DA RESPOSTA DE ACELERAÇÃO NO TOPO DA TORRE NAS DIREÇÃO FORA-DO-PLANO QUANDO AS PÁS ESTÃO NAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO E ESTACIONADAS.....	75
FIGURA 7-3: PSD DA RESPOSTA DE ACELERAÇÃO NO TOPO DA TORRE NAS DIREÇÃO NO-PLANO QUANDO AS PÁS ESTÃO NAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO E ESTACIONADAS.	76
FIGURA 7-4: DESLOCAMENTO DAS PÁS NA DIREÇÃO FORA-DO-PLANO.	77
FIGURA 7-5: DESLOCAMENTO DAS PÁS NO SENTIDO DO PLANO DE ROTAÇÃO.....	78
FIGURA 7-6: FREQUÊNCIAS DA TORRE PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES DE SOLO.....	79
FIGURA 7-7: DESLOCAMENTO DA TORRE NA DIREÇÃO FORA-DO-PLANO PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE SOLOS.	80
FIGURA 7-8: DESLOCAMENTO DA PÁ 1 NA DIREÇÃO FORA-DO-PLANO PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE SOLOS.	81
FIGURA 7-9: DESLOCAMENTO DA PÁ 1 NA DIREÇÃO NO-PLANO PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE SOLOS.	82

FIGURA 7-10: DESLOCAMENTOS DA TORRE NA DIREÇÃO FORA-DO-PLANO PARA TRÊS DIFERENTES VELOCIDADES DE ROTAÇÃO.	83
FIGURA 7-11: DESLOCAMENTOS DA TORRE NA DIREÇÃO NO-PLANO PARA TRÊS DIFERENTES VELOCIDADES DE ROTAÇÃO.	83
FIGURA 7-12: DESLOCAMENTOS DA PÁ 1 NA DIREÇÃO FORA-DO-PLANO PARA TRÊS DIFERENTES VELOCIDADES DE ROTAÇÃO.	84
FIGURA 7-13: DESLOCAMENTOS DA PÁ 1 NA DIREÇÃO NO-PLANO PARA TRÊS DIFERENTES VELOCIDADES DE ROTAÇÃO.	84
FIGURA 0-1 - PROPRIEDADES DA PÁ AO LONGO DO RAIO. FONTE: (SUN E JAHANGIRI, 2018).....	93

LISTA DE SÍMBOLOS

Δt	Período de tempo
V_o	Velocidade do vento
A	Área da seção transversal
ρ_{ar}	Densidade do ar
C_p	Power coeficiente
A	Fator de indução axial
a'	Fator de indução tangencial
ω	Velocidade angular do rotor
V_{rel}	Velocidade tangencial do vento
$EI(x)$	Rigidez de flexão
$\mu(x)$	Massa variável da pá
L	Comprimento da pá
$\psi_i(t)$	Ângulo azimutal
$q_{i,in}(t)$	Deslocamento no plano de rotação na ponta da pá (geral)
$q_{1,in}(t)$	Deslocamento no plano de rotação na ponta da pá 1
$q_{2,in}(t)$	Deslocamento no plano de rotação na ponta da pá 2
$q_{3,in}(t)$	Deslocamento no plano de rotação na ponta da pá 3
$q_{i,out}(t)$	Deslocamento fora-do-plano de rotação na ponta da pá (geral)
$q_{1,out}(t)$	Deslocamento fora-do-plano de rotação na ponta da pá 1
$q_{2,out}(t)$	Deslocamento fora-do-plano de rotação na ponta da pá 2

$q_{3,out}(t)$	Deslocamento fora-do-plano de rotação na ponta da pá 3
$\phi_{in}(x)$	Modo de vibração <i>no-plano</i>
$\phi_{out}(x)$	Modo de vibração <i>fora-do-plano</i>
$u_{i,in}(x,t)$	Deslocamento no plano de rotação para qualquer ponto “x” ao longo da pá
$u_{i,out}(x,t)$	Deslocamento fora-do-plano de rotação para qualquer ponto “x” ao longo da pá
$\theta_{i,in}$	Varição do ângulo a partir do deslocamento no plano de rotação
$\theta_{i,out}$	Varição do ângulo a partir do deslocamento fora-do-plano de rotação
V	Energia potencial
T	Energia Cinética
$M(x)$	Momento fletor
$N_{máx}$	Força gravitacional
$G(x)$	Força centrífuga
$r_i(t)$	Vetor de posição da pá
$v_i(t)$	Vetor velocidade da pá
M_n	Massa concentrada da nacelle + torre
[M]	Matriz de massa
[C]	Matriz de amortecimento
[K]	Matriz de rigidez
\mathbf{M}_{se}	Matriz de massa sistema estrutura – solo

\mathbf{C}_{se}	Matriz de amortecimento sistema estrutura – solo
\mathbf{K}_{se}	Matriz de rigidez do sistema estrutura – solo
$\ddot{\mathbf{x}}_g(t)$	Corresponde à aceleração do solo
ν	Coefficiente de Poisson
G	Módulo de cisalhamento
E_S	Módulo de elasticidade do solo
$\bar{v}(H)$	Velocidade média do vento na altura do hub
x	Posição ao longo da pá
Δv	Mudança na velocidade do vento entre o hub e o topo da pá na posição vertical.
σ_v^2	Variância (relacionada à intensidade da turbulência)
c	Coordenada Monin
k	Constante de Von Karman
z_0	Comprimento da rugosidade
u_*	Velocidade de cisalhamento do vento

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Qual será a fonte de energia do futuro? Esta pergunta não é simples de se responder e nem possui uma única resposta. A busca por soluções para o problema energético mundial através de fontes que sejam capazes de atender o modo de vida na sociedade atual de forma ambientalmente sustentável é hoje uma obsessão mundial. A conscientização sobre o aquecimento global como problemática real e atual e a diminuição das fontes de energia não renováveis são estimulantes para iniciativas que buscam o emprego de fontes renováveis de energia; bem como a busca por novas opções de geração de energia elétrica “limpa”. Deste modo, voltando a pergunta inicial do texto, pode-se considerar que a energia eólica surge como uma alternativa legítima que já tem sido utilizada, mas ainda tem muito a ser explorada na atualidade e no futuro.

Comprovando a tendência de a energia eólica ser uma fonte de energia protagonista no futuro, a Figura 1-1 mostra que o avanço mundial na capacidade instalada para o aproveitamento desse tipo de fonte energética tem sido exponencial (dados entre 2001 e 2017). No final do ano de 2017, a potência mundial instalada por meio de turbinas eólicas era cerca de 539 GW, o que representou um crescimento de mais de 2000% em 17 anos (G.W.E.C., 2018).

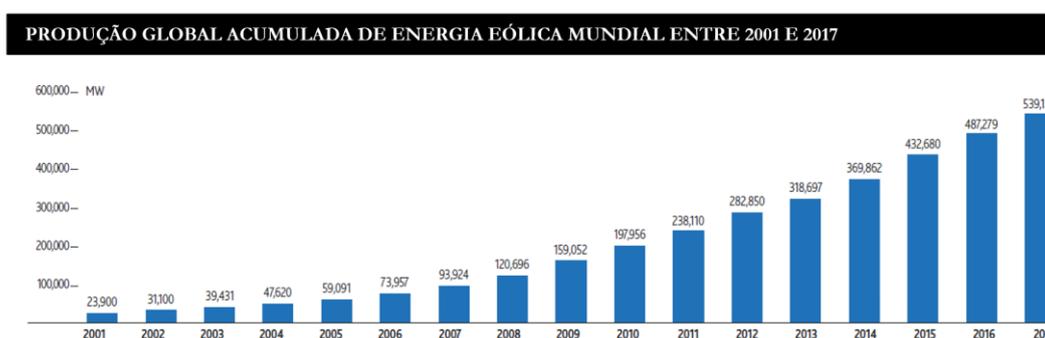


Figura 1-1 - Produção de energia eólica mundial entre 2001 e 2017. Fonte: Global Wind Energy Council, (2018).

O Brasil tem acompanhado a tendência mundial em relação ao uso da energia eólica, tornando-a cada vez mais relevante na matriz energética do país. Analisando a capacidade instalada para o aproveitamento de energia eólica, percebe-se que esta tem crescido

significativamente nos últimos anos e se tornou complementação importante às tradicionais fontes de energia hidroelétrica e termoelétrica. Segundo dados da Global Wind Energy Council, 2018 o Brasil foi o sexto país que mais aumentou sua capacidade instalada no ano de 2017, aproximadamente 2022 MW foram instalados, o que correspondeu a 4% da capacidade instalada em todo mundo neste mesmo ano (Figura 1-2). Isso mostra que investimentos têm sido feitos no país em busca da diversificação de fontes energéticas e de aproveitar a grande capacidade eólica que o país possui.



Figura 1-2 - 10 Maiores capacidades instaladas em 2017. Fonte: Global Wind Energy Council, (2018)

O Brasil possui um dos maiores recursos eólicos do mundo, excedendo as atuais necessidades de eletricidade do país em aproximadamente três vezes. Em 2017, o recorde de geração de energia eólica do Brasil foi quebrado com a produção de 10% e 11% da demanda nacional de eletricidade em agosto e setembro, respectivamente. No Nordeste, durante um período em que os reservatórios de hidrelétricas na região estavam muito baixos, a energia eólica forneceu mais de 60% da demanda de eletricidade da região, superando todos os recordes de geração anteriores (Global Wind Energy Council, 2018).

Atualmente os 14,7 GW instalados estão indiscutivelmente aquém do potencial que o país apresenta; apesar disso, percebe-se que a energia eólica já desempenha um papel importante na produção de energia elétrica atual e seu estudo se mostra de enorme valia para ainda maior desenvolvimento desta proeminente fonte energética.

Consolidado o panorama da relevância da energia eólica no cenário mundial e também nacional, pode-se então dar-se um passo adiante em busca de entender o processo de geração de energia e principalmente o funcionamento dos instrumentos utilizados neste processo, que são o foco desse estudo. No processo de transformação de energia por meio do vento, o

principal instrumento são os aerogeradores (Figura 1-3). Eles são, portanto, dispositivos essenciais no estudo dessa área, pois são eles os responsáveis por extrair a energia cinética dos ventos e convertê-la em energia elétrica.



Figura 1-3: Exemplo de aerogerador. Fonte: Global Wind Energy Council, (2018).

A energia eólica é produzida pelo fluxo de ar na atmosfera, por um processo no qual a energia cinética dos ventos é convertida em trabalho do eixo, que por sua vez é transformado em energia elétrica na nacela do aerogerador, que está localizada no topo da torre de sustentação, como visto na Figura 1-4 (FEIJÓ *et al.*, 2010).

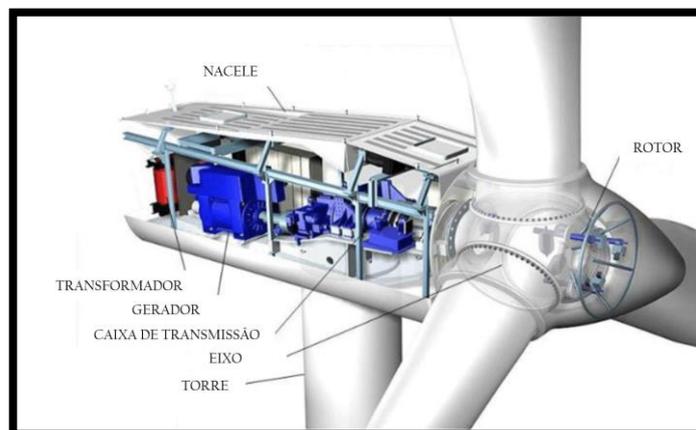


Figura 1-4: Localização da nacela. Fonte: Feijó *et al.*, (2010).

A capacidade energética de um aerogerador pode ser simplificada como diretamente proporcional ao tamanho das suas pás, assim para extrair eficazmente os vastos recursos eólicos, os aerogeradores de grande capacidade energética, estão apresentando rotores com grandes diâmetros, e torres bastante altas - para comportar os rotores - e delgadas - para não sobrecarregar demais a fundação. Isso tudo tem se tornado possível devido ao

desenvolvimento de materiais de alta resistência e baixa densidade. Em contrapartida, a consequência dessa nossa tendência é que os aerogeradores tornam-se vulneráveis às fontes externas dinâmicas. Deste modo, as cargas de vento e de ondas do mar (aerogeradores offshore) ou mesmo ações excepcionais como sismos podem resultar em vibrações excessivas nessas estruturas (ZUO *et al.*, 2018).

O principal problema dessa vulnerabilidade é que vibrações excessivas podem comprometer a produção de energia eólica, causar danos por fadiga nos componentes estruturais e até mesmo danos estruturais diretos em condições extremas. Segundo Andersen *et al.*, (2012) para garantir um funcionamento seguro e eficaz das turbinas eólicas, é importante entender com precisão os comportamentos dinâmicos devidos às cargas externas de vibração e é esse que esse trabalho objetiva fazer.

Ao se analisar dinamicamente os aerogeradores, um aspecto relevante a ser considerado é a fundação, uma vez que o solo deixa a estrutura mais flexível do que ela seria se a considerasse totalmente engastada. Por conseguinte, a frequência natural do sistema é modificada pela interação solo-estrutura (ANDERSEN *et al.*, 2012).

Segundo Lombardi *et al* (2013), o procedimento para uma avaliação precisa da frequência natural depende da condição de suporte, que por sua vez depende da resistência e rigidez do solo circundante e também das dimensões da fundação. Além disso, deve ser assegurado que durante toda a vida operacional a frequência natural do sistema não se aproxime de nenhuma frequência de excitação; isso levaria à amplificação da resposta dinâmica das turbinas provocando maiores deflexões e/ou rotações das torres e pás além da inclinação que pode ser tipicamente tolerada.

Deste modo, além da elucidação sobre os aspectos dinâmicos dos aerogeradores já citados como objetivo desse trabalho, busca-se também nessa dissertação uma melhor compreensão da influência da condição operacional (turbina estacionada e em movimento), da interação solo-estrutura, e da velocidade do rotor bem como todos os parâmetros importantes para a correta e precisa análise dinâmica de aerogeradores.

Uma observação importante a se fazer, é que este texto abrange somente turbinas eólicas de eixo horizontal (HAWT), uma vez que a maioria das turbinas comerciais utiliza esse projeto e que esta é o objeto de estudo desta dissertação.

1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

A proposta do presente de trabalho é realizar a análise dinâmica no tempo de um aerogerador - modelo NREL 5MW - excitado por cargas dinâmicas em diferentes condições de regime e diferentes condições de engastamento no solo.

- Primeiramente, tem-se como alvo a análise das amplitudes das respostas no tempo para as duas condições operacionais da turbina: ela estacionada e em movimento. Observa-se principalmente a diferença da magnitude das respostas para cada uma das condições. Ademais, é examinado também o grau da influência da condição operacional nas respostas no-plano e fora-do-plano de rotação das turbinas, ou seja, busca-se saber qual direção tem-se maior influência do regime de operação.
- É foco também deste trabalho a investigação da influência da interação solo-estrutura nas amplitudes das respostas da turbina devido as excitações dinâmicas que ela está submetida. Três tipos de solos são utilizados para analisar essa condição, sendo eles solos tipicamente: mole, médio e duro. Assim, busca-se estudar quatro amplitudes de respostas para as diferentes condições de ISE que são a turbina totalmente engastada no solo e a turbina considerando a interação solo-estrutura para os três diferentes tipos de solo. É objetivo também, verificar a influência da ISE na frequência natural da torre do modelo. Ademais, busca-se também saber qual direção (no-plano ou fora do plano de rotação) tem-se maior influência da ISE.
- Por fim, busca-se estudar neste trabalho a influência da velocidade de rotação das pás nas amplitudes da resposta ao longo do tempo. Três velocidades são utilizadas para este fim, uma velocidade inicial de partida, uma velocidade média ideal de operação e uma velocidade última (acima dessa velocidade o aerogerador é freado automaticamente). Todas essas velocidades são fornecidas pelo fabricante da turbina NREL 5MW. É objetivo também saber qual direção (no-plano ou fora do plano de rotação) tem-se maior influência do aumento da velocidade de rotação.

Esses três aspectos especificados anteriormente são o foco principal deste trabalho. O qual tem os seguintes objetivos específicos:

- Compreensão dos aspetos gerais relativos às estruturas de aerogeradores. Visto que para se estudar mais a fundo um modelo específico de aerogerador é necessária uma base de conteúdo que solidifique esse conhecimento;
- Desenvolver dois modelos para se estudar o aerogerador do tipo NREL 5MW. Um desses modelos considera o efeito da interação solo-estrutura e o outro não. Eles serão excitados por cargas dinâmicas (vento + sismo) e analisados sob as condições estacionadas e em operação;
- Desenvolvimento de códigos computacionais para automatização das respostas dos modelos;

1.3 METODOLOGIA

A metodologia proposta para investigar o comportamento dinâmico e estrutural de aerogeradores baseia-se nas seguintes etapas:

- Inicialmente, é feita uma busca por referências correspondente ao tema em estudo, procurando-se trabalhos reconhecidos que possuem abordagem sobre a análise dinâmica de aerogeradores considerando os efeitos da interação solo-estrutura.
- A partir dos modelos de Fitzgerald e Basu (2016) e Harte *et al.* (2012), dois modelos analíticos foram adaptados. O primeiro modelo apresenta oito graus de liberdade, sendo composto de três pás (dois graus de liberdade para cada pá) e uma *torre+nacele* representada por uma massa concentrada com dois graus de liberdade.
- Posteriormente um segundo modelo foi adaptado. Para isso, a partir do modelo de oito graus de liberdade descrito anteriormente, foram acrescentados mais dois a fim de se estudar a ISE.
- Selecionados os modelos, escolheu-se a abordagem de Euler-Lagrange para se obter as equações do movimento que o rege. Essa abordagem é fundamentada no critério de energia mínima, sendo que os parâmetros de entrada são as energias potencial e cinética. Deste modo, a definição do funcionamento físico da turbina foi essencial para a correta obtenção das equações que regem o movimento do sistema. Separando os critérios que definem a energia cinética e potencial e com auxílio dos softwares Maple e MatLab, pôde-se obter o Lagrangiano e, por conseguinte as equações do movimento para o modelo;

- Posteriormente, através de uma análise modal, compara-se os dois modelos com os dados presentes na literatura;
- Comparado o modelo, seguiu-se para a análise dinâmica do modelo de aerogerador proposto nessa dissertação, obtendo dados de deslocamento *vs* tempo para cada uma das três análises principais descritas na Seção 1.2;
- Por fim, a partir dos resultados conclusões e sugestões para trabalhos futuros são feitas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é composto por oito capítulos dispostos do seguinte modo:

O primeiro capítulo trata-se de uma introdução geral sobre o contexto atual da produção de energia eólica no Brasil e no mundo. Neste capítulo dados fornecidos pelas entidades representativas do setor são apresentados mostrando a relevância do presente estudo. Em seguida neste mesmo capítulo, são apresentados os objetivos, metodologia utilizada e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica. É feita inicialmente uma descrição do que é uma turbina eólica e seu desenvolvimento ao longo da história. Posteriormente, são apresentadas diversas pesquisas desenvolvidas no campo da dinâmica estrutural de aerogeradores. Por fim, é apresentado e explicado brevemente diversas pesquisas que abordam as excitações dinâmicas e os efeitos da interação solo-estrutura, da condição operacional e da velocidade de rotação.

No terceiro capítulo é explicado o funcionamento básico de uma turbina eólica, as cargas envolvidas e as normas que regem estas estruturas. São discutidos aí os aspectos relevantes que devem estar presentes em um estudo como este.

No quarto capítulo são apresentados os modelos escolhidos. A partir destes modelos toda a fundamentação matemática que serviu de alicerce para o desenvolvimento do presente trabalho são descritas; bem como as considerações e simplificações realizadas.

O quinto capítulo apresenta uma breve análise da interação-solo estrutura realizada.

O sexto capítulo detalha sobre os carregamentos utilizados e como estes foram inseridos no modelo.

O sétimo apresenta os resultados, e as análises que podem ser extraídas a partir desses.

O oitavo e último capítulo, apresenta as conclusões obtidas neste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 BREVE HISTÓRICO SOBRE AEROGERADORES

A ideia de se utilizar o vento como fonte para se extrair energia começou basicamente em 1891 com o dinamarquês Poul La Cour. Ele idealizou a primeira turbina eólica geradora de eletricidade. Nesta época já existiam os moinhos de vento clássicos que eram adequados para girar a partir de ventos suaves, de baixa velocidade. Entretanto não eram capazes de ter suas pás movimentadas por ventos muito fortes, como de uma tempestade por exemplo. No entanto, para La Cour, o moinho de vento era uma usina e, portanto, deveria produzir o máximo de energia que a ele fosse disponibilizado pela natureza; sendo, assim, capaz de funcionar em situações extremas de velocidade de vento também. Deste modo, o moinho de vento tradicional foi por ele mudado, e esse foi o pano de fundo para suas experiências em aerodinâmica a partir de 1896 (ACKERMANN E SÖDER, 2002).

O conhecimento da época considerava a ação do vento nas pás como um impulso de partículas, o que tornava possíveis os cálculos newtonianos. La Cour começou a testar pequenos modelos de moinhos de vento em um túnel de vento, provavelmente o primeiro desses experimentos no mundo com foco em moinhos de vento. Depois de apenas algumas semanas de experimentos, ele chegou a conclusões gerais que ainda são aceitas hoje, com por exemplo: para produzir um máximo de energia com uma determinada área de asa, o número de asas deve ser pequeno, sua nacele pequena e a velocidade de rotação constante (ALATI *et al.*, 2015).

Com base nesses experimentos, ele sugeriu um moinho ideal. O modelo desenvolvido apresentou resultados quatro vezes melhor (por m^2 de área de asa) do que o resultado médio dos cinco moinhos já existentes, que ele havia medido.

Segundo Ackermann e Söder (2002), somente vinte anos após a morte de La Cour, um novo moinho foi construído, em 1929 por Askov. Este modelo foi diretamente feito de acordo com o padrão ideal de La Cour. Para comparação, os moinhos de vento hoje são cerca de 3 vezes mais eficazes que o moinho de 1929. É dispensável dizer que existem algumas suposições e problemas com o modelo de La Cour, contudo os resultados indicam que um passo importante foi dado por ele.

No entanto, durante grande parte do século XX, houve pouco interesse em utilizar e pesquisar sobre turbinas eólicas. O principal uso desta energia nesta época era para carregar baterias em residências remotas e mesmo esses sistemas de baixa potência foram rapidamente substituídos quando o acesso à rede elétrica se tornou disponível (KAKUYA *et al.*, 2017).

Algumas exceções podem ser registradas como avanço nesta área durante este período; uma delas é a turbina eólica Smith-Putnam de 1250 kW construída nos EUA em 1941. Esta notável turbina possuía um rotor de aço de 53 m de diâmetro total e embora uma de suas pás tenha falhado catastróficamente em 1945, permaneceu a maior turbina eólica construída por cerca de 40 anos (HONGWANG, 2012). Duas turbinas que também valem a pena serem destacadas são a Balaclava, de 100 kW e de 30 m de diâmetro, construída na então URSS em 1931, e a Gedser de 200 kW de 24 m de diâmetro que foi construída na Dinamarca em 1956 (ALATI *et al.*, 2015).

Apesar dessas exceções citadas acima, houve pouco interesse na geração de energia eólica até que o preço do petróleo subiu drasticamente em 1973. O aumento súbito no preço do petróleo estimulou um número substancial de programas de pesquisa e desenvolvimento financiados pelos governos de vários países. Nos EUA, por exemplo, isso levou à construção de uma série de protótipos de turbinas começando como o Mod-0 de 100 kW de 38 m de diâmetro em 1975 e o Mod-5B de 2,5 MW com diâmetro de 97,5 m em 1987. Programas similares foram implantados no Reino Unido, Alemanha e Suécia.

Nesta época havia uma incerteza considerável sobre qual arquitetura poderia ser mais rentável e vários conceitos inovadores foram investigados em escala real. No Canadá, um aerogerador Darrieus de eixo vertical de 4 MW foi construído e este conceito também foi investigado no Sandia Vertical Axis Test Facility de 34 m de diâmetro nos EUA. Em 1981, um inovador aerogerador de eixo horizontal de 3 MW foi construído e testado nos EUA. Entretanto, nesta época ainda as turbinas possuíam altura limitada e esta geometria era preferida pois os problemas técnicos que surgiam eram mais fáceis de serem concertados e menos dispendiosos (FEIJÓ *et al.*, 2010).

Segundo Andersen *et al.* (2012), o chamado conceito de turbina eólica "dinamarquesa" – turbinas de grandes dimensões – surgiu em 1980, a partir de um modelo de rotor de três pás, com regulador de velocidade sensor de acionamento por indução de velocidade fixa. Esta

arquitetura enganosamente simples provou ser extraordinariamente bem-sucedida e assim foi altamente difundida. Desde então, o uso deste tipo de aerogeradores para geração de energia tem se espalhado por todo mundo aumentando a relevância do estudo desta área e com certeza foi fundamental para se padronizar a geometria dos aerogeradores para a que se conhece hoje.

O estímulo para o desenvolvimento da energia eólica em 1973 foi o preço do petróleo e a preocupação com recursos limitados de combustíveis fósseis. Agora, é claro, o principal motivador do uso de turbinas eólicas para gerar energia elétrica são as emissões muito baixas de CO_2 (durante todo o ciclo de vida de fabricação, instalação, operação) e o potencial da energia eólica para ajudar a limitar a mudança no clima (FEIJÓ *et al.*, 2010).

2.2 ANÁLISE DINÂMICA DE AEROGERADORES

A energia eólica tem se tornado foco de pesquisa nos últimos anos; assim, extensivos trabalhos têm sido conduzidos por diferentes pesquisadores para investigar os comportamentos dinâmicos de turbinas eólicas sob ação do vento, ondas do mar e/ou cargas sísmicas (KAKUYA *et al.*, 2017). Como nesse trabalho estuda-se turbinas on-shore, pesquisas com foco nas cargas marítimas não são apresentados no estado da arte, mas sim estudos que utilizam o vento e o sismo como fonte de vibração.

Uma das primeiras pesquisa realizadas na área de aerogeradores excitados sismicamente foi realizada por Witcher (2005). Ele fez uma análise sísmica de turbinas eólicas no domínio do tempo. Para isso, um modelo simplificado de uma turbina eólica sujeita a carga de vento turbulento foi excitado pelo movimento do solo correspondente a um terremoto. Observando os resultados, concluiu-se que o método de análise de terremotos apresentado neste trabalho - que adota os métodos codificados que foram desenvolvidos para uso no projeto de edifícios - podem ser aplicados a turbinas eólicas. Ou seja, o mesmo código para avaliação de terremotos edifícios podem ser usados no estudo de sismos em turbinas eólicas.

Mais recentemente, Kim *et al.* (2013) analisou a resposta sísmica de uma fundação cônica de concreto para turbinas eólicas de 5 MW. A fim de chegar em uma resposta conclusiva, eles realizaram uma análise do espectro de resposta 3D considerando o peso da turbina e dos elementos complementares. Os resultados da análise indicaram que há tensões de tração

muito severas na fundação de concreto perto do suporte do “pescoço” (região menos espessa entre a torre e a fundação), requerendo reforço nessa região.

Kjørlaug *et al.* (2014), assim como Witcher (2005), também estudaram a resposta dinâmica de turbinas eólicas submetidas à terremoto e à carga de vento. Duas turbinas eólicas diferentes foram utilizadas nesse estudo: uma turbina eólica de 65 kW, que anteriormente foi submetida a testes de vibração na Universidade da Califórnia, em San Diego (UCSD) e uma turbina eólica de referência de 5 MW produzida pelo National Renewable Energy Laboratory. A turbina eólica de 65 kW foi utilizada para comparar sua resposta sísmica no SAP2000 aos resultados obtidos a partir dos testes na UCSD, e serviu como uma validação para a modelagem numérica da turbina eólica de 5 MW. Para a turbina de 5 MW, o solo circundante foi incluído no modelo para simular a interação solo-estrutura, e foi excitado pelos componentes horizontais e verticais do terremoto de 1985 em Nahanni, Canadá. Concluiu-se que os efeitos da ISE são de extrema importância, uma vez que alguns solos produziram respostas muito mais altas do que outros solos.

Díaz e Suárez (2014) realizaram uma análise sísmica de turbinas eólicas. Nesse estudo foi apresentado um modelo analítico de uma turbina eólica em operação para obter a resposta sísmica devido a três acelerações de base. A turbina Vestas-V82 foi selecionada para demonstrar a metodologia. Os resultados mostraram que apenas os dois primeiros modos de torre em cada direção (fora do plano e no plano) são os mais excitados. Encontrou-se também que o movimento lateral da turbina eólica é mais suscetível a grandes deslocamentos, uma vez que os efeitos aerodinâmicos são insignificantes nessa direção. Por fim, concluiu-se que as tensões calculadas na seção superior da torre devido a cargas operacionais e sísmicas combinadas são maiores do que aquelas devidas a cargas de vento extremas.

Santangelo *et al.*, (2016) realizaram análises desacopladas no domínio do tempo para avaliação sísmica de turbinas eólicas *onshore*. Para isso, foi feito um estudo de caso de uma turbina eólica de 5 MW, apoiada em uma fundação de estacas, modelada por molas não-lineares. Para diferentes registros sísmicos e velocidades do vento, as comparações com simulações totalmente acopladas mostraram que a combinação de análises desacopladas implementadas no domínio do tempo produz resultados precisos, desde que um nível apropriado de amortecimento aerodinâmico seja incluído no modelo.

Katsanos *et al.*, (2016) fizeram uma revisão bibliográfica sobre turbinas eólicas e risco sísmico. O estudo mostra que a relevância do risco sísmico para as turbinas eólicas é mais bem esclarecida pelos dados experimentais disponíveis. A principal contribuição deste trabalho, é então, a identificação dos principais fatores que alteram o desempenho das turbinas durante sismos.

Asareh *et al.*, (2016) estudaram a fragilidade de turbinas eólicas considerando interação aero elástica e sísmica usando o método dos elementos finitos. A partir disso, o comportamento dinâmico não-linear de uma turbina eólica NREL de 5 MW é avaliado considerando diferentes intensidades de terremoto e vento usando um modelo de elementos finitos recém-desenvolvido. A partir dos resultados desta pesquisa, é mostrado que as cargas de terremotos têm efeitos consideráveis no projeto e análise de turbinas eólicas.

Wang *et al.*, (2017) efetuaram um modelo de ensaio e uma análise numérica de uma turbina eólica offshore, com fundação tipo tripé e de fundo fixo, sob cargas sísmicas. Com base nas comparações dos resultados, é demonstrado que o efeito das cargas eólicas e marítimas é menor do que as respostas estruturais quando a estrutura é submetida à carga sísmica, especialmente na influência da resposta global da estrutura. Vê-se que o efeito das condições combinadas de carga sísmica, vento, onda e corrente não pode ser simplesmente sobreposto. Portanto, o efeito de interação na análise sísmica deve ser considerado quando as cargas de vento, onda e corrente tiverem um efeito não desprezível.

Para a avaliação sísmica de turbinas eólicas em áreas sismicamente ativas, as Normas Internacionais e Diretrizes permitem a combinação de duas análises desacopladas sob cargas ambientais e de terremotos, respectivamente. A resposta separada do terremoto é geralmente computada incluindo um amortecimento aerodinâmico adicional no modelo estrutural. Embora alguns trabalhos tenham sido feitos para estimar a eficácia de análises desacopladas para turbinas eólicas terrestres e determinar níveis adequados de amortecimento aerodinâmico, até o momento não foram realizados estudos semelhantes para turbinas eólicas offshore. Deste modo, Santangelo *et al.*, (2018) avalia a precisão de diferentes implementações no domínio do tempo de análises desacopladas para turbinas eólicas offshore e investiga os níveis pertinentes de amortecimento aerodinâmico. O estudo de caso é uma turbina eólica de 5 MW, apoiada em um tripé em águas intermediárias. Os resultados numéricos mostraram que não existe um amortecimento aerodinâmico ideal que minimize o

erro na base da torre. Entretanto, quando a resposta separada do terremoto é calculada usando um amortecimento aerodinâmico de 4%, o Método 1 e o Método 2 com $k = 0,75$ fornecem resultados razoavelmente precisos, conservadores ou não conservativos, enquanto o Método 2 com $k = 1$ fornece resultados sempre conservativos.

2.3 CONDIÇÕES OPERACIONAIS E INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

A análise do efeito da interação entre o solo e a estrutura (ISE) tem como objetivo principal a resposta coletiva de três sistemas interligados: a estrutura, a fundação, e o solo subjacente e ao redor da fundação. Os problemas associados à aplicação prática da ISE para estruturas estão enraizados em uma compreensão deficiente dos princípios fundamentais da mesma (NEHRP Consultants Joint Venture, 2012). Desta forma, este trabalho busca elucidar esta área do conhecimento aplicada a aerogeradores para auxiliar na correta análise dos modelos de turbinas eólicas.

O estudo das condições operacionais também é alvo de melhor compreensão desse trabalho. A análise das turbinas nas suas diferentes formas de atuação é importante para o dimensionamento durante o projeto e também para um melhor plano de manutenção ao longo da vida útil dessas estruturas.

Uma análise dos principais trabalhos relacionados a esta área de estudo foi realizada nesta seção. A fim de se obter uma adequada base teórica para o desenvolvimento desta dissertação.

Nos últimos anos, muitos estudos numéricos e experimentais têm sido conduzidos para investigar a influência da interação solo-estrutura (ISE) nas características de vibração de turbinas eólicas, contudo não há muito tempo que a maioria destes estudos começaram. Andersen *et al.* (2012) foi um dos primeiros trabalhos na área. Eles investigaram o efeito da incerteza do solo na primeira frequência natural de turbinas eólicas offshore para fundações do tipo mono-estaca. Concluindo-se que os resultados apresentam precisão razoável para o método de redução de variância implementado neste tipo de prática.

Paralelamente a Andersen *et al.* (2012), Hongwang, (2012) apresentou um modelo de resposta sísmica incluindo a interação solo-estrutura (ISE) simulando ações de terremoto horizontal e vertical. O modelo proposto foi aplicado a turbinas eólicas de 1.65MW e 3MW.

As duas turbinas eólicas foram analisadas em seis registros históricos de terremotos, tanto horizontais quanto verticais. A análise dos resultados revelou que o ISE representou uma diminuição de 7% na primeira frequência natural, e aproximadamente 10% na aceleração horizontal do topo da torre, 10-12% de queda nos momentos horizontais da base da torre, redução de 6% na carga de cisalhamento horizontal da torre para duas turbinas eólicas.

Harte *et al.*, (2012) investigou a resposta de vibração forçada, no sentido do vento, de uma turbina eólica terrestre. O estudo incluiu os efeitos da interação dinâmica entre a fundação e o solo subjacente e também se estudou o efeito da ISE nas diferentes condições operacionais da turbina. Um modelo de turbinas eólicas terrestres horizontais de múltiplos graus de liberdade (MDOF) foi desenvolvido para análise dinâmica usando uma abordagem Euler-Lagrangiana. O trabalho concluiu que a interação solo-estrutura afeta a resposta da turbina eólica; isso foi examinado em termos do deslocamento estrutural da turbina e também do momento de cisalhamento e flexão da base na torre e na fundação.

Lombardi *et al.*, (2013) e Bhattacharya e Adhikari, (2011) realizaram um dos trabalhos mais relevantes nesta área. Testes de laboratório foram realizados em um modelo de turbina eólica em escala e descobriu-se que as frequências naturais da turbina eólica estavam fortemente relacionadas à flexibilidade da fundação.

Kourkoulis *et al.*, (2014) avaliaram a resposta de um sistema de interação solo-fundação-turbina eólica sujeito a uma carga sísmica. É apresentado como conclusão que a cinemática do sistema pode ser crucial para a resposta de grandes turbinas eólicas submetidas a cargas simultâneas - ambientais e sísmicas. Embora não seja instantaneamente catastrófico, o acúmulo de rotação da fundação pode levar a turbina a atingir os limites de capacidade de serviço no início da operação.

Austin e Jerath, (2017) analisaram os efeitos da interação solo-fundação-estrutura na resposta sísmica de turbinas eólicas de eixo horizontal de 65 kW, 1 MW e 2 MW com torres de aço. Quatro tipos de fundações foram analisados, incluindo fundações tipo: sapata, mono-estaca, grupo de estacas e fundação ancorada. O solo é modelado de forma implícita (módulo de reação do subleito) e explicitamente. Concluiu-se que para os casos específicos estudados nesta pesquisa, o efeito da interação solo-estrutura na resposta sísmica de turbinas eólicas é significativo. Portanto, a análise sísmica das torres de turbinas eólicas nesses casos deve ser considerada.

Zuo *et al.*, (2018) realizaram análises dinâmicas de operação de turbinas eólicas incluindo interação solo-estrutura. Nesse trabalho, as pás e a torre foram explicitamente modeladas utilizando o software Abaqus e a interação solo-estrutura (ISE) considerada. As influências da condição operacional e da velocidade do rotor nos comportamentos dinâmicos são sistematicamente investigadas. Verifica-se que as respostas da turbina eólica na condição de operação são muito maiores do que aquelas na condição estacionada. Conclui-se, também, que a interação solo-estrutura pode afetar substancialmente as vibrações da torre, embora tenha um efeito insignificante nas vibrações no plano das pás.

3 FUNCIONAMENTO BÁSICO DE UM AEROGERADOR E AS CARGAS ENVOLVIDAS

Feita a revisão bibliográfica dos conteúdos abordados nesta dissertação outro passo agora é conhecer o funcionamento físico do aerogerador e as cargas envolvidas nas suas mais variadas condições de operação. Este é o estudo prévio que dará condições para se compreender a definição do modelo de aerogerador adotado nesta dissertação bem como as formulações matemáticas, ambos apresentados no capítulo 4.

3.1 Funcionamento básico de um aerogerador e suas características relevantes para este estudo

Primeiramente então, objetiva-se neste tópico descrever a aerodinâmica de uma turbina eólica de forma qualitativa e quantitativa, a fim de ter os conhecimentos básicos da física envolvida em todo o processo e, desta forma, se ter um alicerce para se desenvolver um modelo que represente as características essenciais de um aerogerador.

3.1.1 Energia contida em uma rajada de vento

Já é sabido que uma turbina eólica é um dispositivo que transforma a energia cinética do vento em eletricidade (FEIJÓ *et al.*, 2010). Pensando-se então na energia contida no vento, deve se isolar um volume que represente todo o vento que passará pela área de atuação dos aerogeradores. Considera-se assim uma área normal à velocidade do vento, como mostra a Figura 3-1. Está é a área varrida pelas pás do aerogerador, sendo que parte desta energia será por ele retirada e transformada.

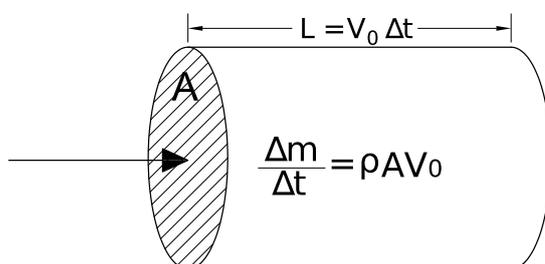


Figura 3-1: Energia de uma rajada. Fonte: Hau, 2013 (Adaptado).

Analisando a Figura 3-1, conclui-se que após um período de tempo Δt , o volume de partículas de ar que passou por esta área é proporcional a própria dimensão dessa área e a velocidade do vento; como descrito na Equação (3-1).

$$Volume = A \cdot V_0 \cdot \Delta t \quad (3-1)$$

Em que A é a área da seção transversal e V_0 é a velocidade do vento.

O volume que passa por essa seção transversal logicamente possui uma massa e essa massa será o próprio volume multiplicado pela densidade do vento (Equação (3-2)).

$$\Delta m = \rho_{ar} \cdot A \cdot V_0 \cdot \Delta t \quad (3-2)$$

Em que ρ_{ar} é a densidade do ar.

Sabendo que esta massa quantificada pela Equação (3-2) possui uma velocidade, conclui-se por consequência que na mesma há uma energia cinética que pode ser calculada como exposto pela Eq. (3-3).

$$E_{cinética} = \frac{\Delta m \cdot V^2}{2} \rightarrow \frac{(\rho \cdot A \cdot V_0 \cdot \Delta t) \cdot V_0^2}{2} \rightarrow \frac{\rho \cdot A \cdot \Delta t \cdot V_0^3}{2} \quad (3-3)$$

A partir da Eq. (3-3) tem-se então a energia do vento, mas qual é a potência que este mesmo fornece às pás? Fisicamente, potência é a grandeza que determina a quantidade de energia concedida por uma fonte a cada unidade de tempo (HAU, 2013). Assim, a potência disponível na rajada de vento pode ser encontrada através da Eq. (3-4).

$$P_{disponível} = \frac{E_{cinética}}{\Delta t} = \frac{\rho \cdot A \cdot V_0^3}{2} \quad (3-4)$$

A potência disponível é assim proporcional à densidade do ar, à área do rotor e à velocidade do vento ao cubo.

Mesmo com a otimização dos aerogeradores, sabe-se que, há um limite de extração da energia fornecida pelo vento. Mas qual será a porcentagem máxima da energia contida na rajada de vento e calculada pela Eq. (3-4) que pode ser captada pela turbina? Em 1919, o físico Albert Betz mostrou que, para uma hipotética máquina ideal de extração de energia eólica, as leis fundamentais de conservação de massa e energia permitiam que não mais do que 16/27 (59,3%) da energia cinética do vento fosse capturada. Este limite da lei de Betz pode ser abordado por projetos modernos de turbinas que podem atingir 75 a 85% deste

limite teórico, ou seja, extração de 45%-50% da energia contida na cinética do vento aproximadamente (HAU, 2013).

Isso significa que a potência extraída pela turbina é reduzida por um coeficiente chamado de C_p (*power coefficient*) como visto na Eq. (3-5).

$$P_{extraída} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot V_0^3}{2} \quad (3-5)$$

Concluindo-se assim esse tópico, sabe-se que o objetivo da turbina eólica é transformar essa potência em energia útil, com o maior aproveitamento possível e da maneira mais barata. Portanto, segundo Hau (2013) pelo menos dois fatores são essenciais para se otimizar a geração de energia de um aerogerador; um é a dimensão das pás (área varrida) e o outro fator é a localização da turbina visto que este definirá as condições de vento e sua velocidade.

3.1.2 Simples descrição do funcionamento de uma turbina

Conhecendo-se um pouco da energia fornecida pelo vento e os fatores que ampliam essa captação energética, é essencial se saber como que os aerogeradores são capazes de realizar este trabalho de extração de energia e as cargas geradas nestes dispositivos a partir do seu funcionamento.

Primeiramente então, é certo se pensar que é necessário um dispositivo que reduza a velocidade do vento para extrair sua energia cinética e, ao mesmo tempo, crie um o torque que eventualmente possa conduzir a energia gerada pelo movimento a um gerador elétrico. O dispositivo que atende ambas necessidades são as pás, que possuem seções transversais projetadas em forma de aerofólios, como mostrado na Figura 3-2.

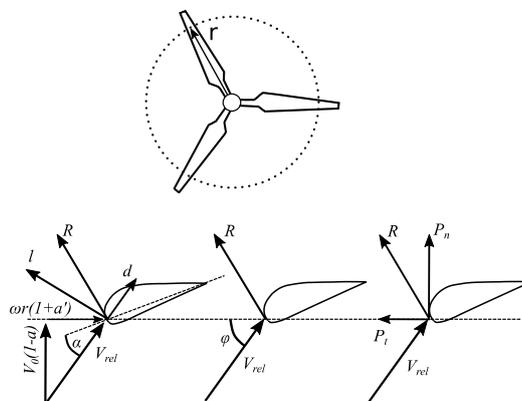


Figura 3-2: Projeção das forças nas pás. Fonte: Hau, 2013 (Adaptado).

Para entender melhor o funcionamento das pás, pode-se observar a Figura 3-2. Nela, a parte superior mostra o rotor visto de frente; já a parte inferior exhibe o corte no plano do rotor na posição radial, r , indicado pela linha tracejada e visto diretamente de cima.

Os coeficientes a e a' são chamados de fatores de indução axial e tangencial, respectivamente, e estão relacionados com a geometria da pá. Se esses coeficientes forem conhecidos juntamente com o vento relativo, V_{rel} , aproximando-se do plano do rotor, pode ser traçado o chamado triângulo velocidade (esboço no canto inferior esquerdo na Figura 3-2).

A primeira coisa que se nota na parte inferior da Figura 3-2 é que a velocidade do vento se aproximando do rotor é reduzida por um fator $a \cdot V_0$ de modo que o vento aparente no plano do rotor é $(1 - a) \cdot V_0$, isto se deve a geometria da pá que é adequada para a transferência da força do vento que incide perpendicularmente a pás para o plano das pás (velocidade de rotação).

A velocidade no plano - velocidade de rotação da pá - varia com a distância radial r ao eixo do rotor, $\omega \cdot r$, em que ω é a velocidade angular do rotor; entretanto, há também uma pequena contribuição extra representado por a' , de modo que a velocidade tangencial efetiva experimentada pelo rotor é $(1 + a') \cdot \omega \cdot r$.

Por definição, a sustentação é perpendicular e o arrasto é paralelo à velocidade relativa, como esboçado na Figura 3-2. A carga aerodinâmica líquida, denotada por R , é a soma vetorial do vetor sustentação (l) e do vetor arraste (d) e é a integral da distribuição de pressão e atrito na superfície das pás na direção radial.

Desmembrando o vetor resultante de carga aerodinâmica em dois componentes tem-se um vetor na direção fora do plano denominado p_n (direção do vento), e um componente no plano, denominado p_t . O componente no plano, p_t , fornece o torque necessário ao eixo e o carregamento normal fornece uma contribuição para a força de impulso necessária que está reduzindo a velocidade do vento para extrair energia do vento. É também p_n e p_t que são responsáveis pelas velocidades induzidas do vento $a \cdot V_0$ e $a' \cdot \omega \cdot r$ uma vez que estas são as reações a partir velocidade do vento sobre as pás. As direções *fora-do-plano* e *no-plano*

sobre as quais p_n e p_t atuam, serão utilizadas nesta dissertação para representar os movimentos, forças e deslocamentos no modelo de aerogerador a ser mostrado.

Desta maneira, pode-se encerrar a breve descrição de como funciona a interação das pás com o vento incidente em uma turbina eólica, seguindo então tem-se os carregamentos provenientes desta interação.

3.2 Carregamentos

Para os aerogeradores cumprirem seus objetivos de gerarem energia é necessário, dentre outras coisas, um projeto que sobreviva a todas as cargas esperadas para um horizonte de no mínimo 20 anos. Para isso, é necessário conhecer das condições ambientais que a turbina eólica estará sujeita, tais como a distribuição da velocidade do vento, a sismologia da região (ou outros tipos de cargas excepcionais); e, para uma turbina eólica offshore, também uma descrição das fora das ondas (Zuo *et al.*, 2018).

As turbinas eólicas estão sujeitas a cargas e tensões muito específicas, mas qual seria então a carga ou as cargas críticas para este tipo de projeto? Analisando à primeira vista, o principal problema parece ser a instabilidade durante fortes tempestades e furacões, por exemplo. No entanto, segundo Hau (2013), as cargas alternadas contínuas - mesmo sob condições normais de vento - são em geral as mais problemáticas. Cargas alternadas são mais difíceis de lidar do que cargas estáticas, porquanto a perturbação constante do material o torna fatigado.

Nas turbinas eólicas atuais, as dimensões dos componentes apresentam um problema adicional. Em geral, a busca por turbinas que gerem mais energia necessariamente implica no aumento nas dimensões das pás. Se as dimensões do rotor aumentam, as dimensões de outros componentes também devem aumentar, como a altura da torre por exemplo. Estruturas com grandes dimensões são flexíveis e as cargas variáveis criam, assim, uma interação que induz vibrações e ressonâncias e pode produzir componentes de alta carga dinâmica (HAU, 2013).

Deste modo, o dimensionamento estrutural de uma turbina eólica deve ser considerado sob três aspectos diferentes:

- O primeiro requisito é que a resistência à fadiga dos componentes deve ser garantida por sua vida útil, geralmente de 20 a 30 anos. Como já é sabido, o problema da "vida em constante fadiga" é praticamente o principal problema das turbinas eólicas.
- Em segundo lugar, deve-se prestar atenção para garantir - do ponto de vista da resistência à ruptura - que os componentes sejam projetados para as cargas extremas encontradas. Isso significa, em termos reais, que a turbina e seus componentes essenciais devem ser capazes de suportar as maiores velocidades de vento ou outras cargas excepcionais que possam ocorrer.
- O terceiro aspecto diz respeito à rigidez dos componentes. O aumento das dimensões, como já dito, torna as estruturas flexíveis. Este fato faz com que as excitações externas produzam vibrações mais severas nestes tipos de materiais do que em componentes mais rígidos. Desta forma, para o comportamento de vibração de uma turbina eólica ser mantido sob controle e evitar ressonâncias perigosas e cargas dinâmicas adicionais, os parâmetros de rigidez de todos os seus componentes devem ser cuidadosamente analisados.

Os principais estados limites que devem ser observados então, podem ser resumidos como: Estado Limite à fadiga gerado pelas cargas alternadas, Estado Limite Último devido a cargas extremas de vento por exemplo, e o Estado Limite de Serviço, no qual verifica-se o deslocamento máximo permitido para as pás e para a torre (ZUO *et al.* , 2018).

Como já visto, os estados limites são resultados de cargas atuando nas turbinas, mas quais são todos os carregamentos presentes nesta estrutura? Qual a origem de cada carga? Todos os carregamentos são considerados em projetos? Estas são algumas das perguntas que surgem ao se tratar de carregamento e serão respondidas nos próximos parágrafos.

Todas as carga possíveis às quais a turbina eólica pode estar submetida nunca podem ser cobertas em toda a sua totalidade, porquanto isso geraria uma situação irreal e assim um superdimensionamento dos componentes e conseqüentemente um custo com materiais desnecessário. Desta forma, as cargas podem ser sempre estipuladas apenas de uma forma idealizada e aproximada como cargas de projeto (AHMAD , 2000).

Observando uma turbina eólica, facilmente se percebe que a torre tem a função basicamente de fornecer a altura necessária para o rotor das pás e ter resistência suficiente para sustentá-

lo. É claro que toda carga e conseqüentemente os deslocamentos que torre sofre – seja devido a um vento ou um sismo – refletirá nas pás; entretanto, a interação fluido-estrutura que gera o movimento das pás e os carregamentos provenientes deles ocorrem de maneira mais intensa e principalmente no rotor. Desta forma, o ponto de partida para a maioria dos espectros de carga de uma turbina eólica são as cargas que atuam no rotor (LETCHER, 2017).

As cargas nas pás do rotor são passadas para os outros componentes e, em grande parte, determinam os esforços. As discussões das cargas da interação variável fluido-estrutura que atuam sobre uma turbina eólica podem, portanto, ser concentradas no rotor e tratá-lo como sendo representativa das outras partes. Excetuando-se cargas externas excepcionais como sismos e ondas marítimas.

3.3 Carregamentos nas pás do rotor

Deste modo, focalizando a análise das cargas no rotor das pás pode-se concluir que as causas de todas as forças nele atuantes são resumidamente atribuíveis a três efeitos; que são: os efeitos das forças aerodinâmicas, gravitacionais e inerciais.

Com o intuito de facilitar o entendimento, as diferentes cargas podem ser classificadas de acordo com o seu efeito ao longo tempo e também quanto a sua origem (aerodinâmicas, gravitacionais e inerciais).

Ao se analisar a variação com o tempo, as cargas se dividem em, basicamente, cargas constantes e cargas variáveis; sendo que as variáveis se subdividem em cíclicas e não cíclicas. Já em relação a sua origem tem-se também dois grupos: as aerodinâmicas e outro grupo com as cargas gravitacionais ou inerciais que formam uma única categoria porque basicamente tem ambas origens no peso próprio. Todas as principais cargas presentes no rotor e suas categorias estão resumidas na Figura 3-3.

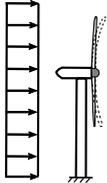
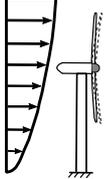
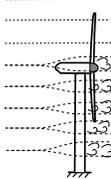
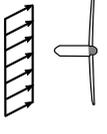
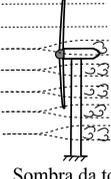
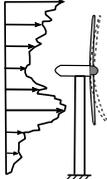
		<i>Forças Aerodinâmicas</i>	<i>Forças de inércia e de gravidade</i>
Carregamento Variável	Carregamento Constante	 Vento com velocidade constante	 Forças centrífugas
	Carregamento Cíclico	 Gradiente vertical do vento  Sombra da torre (jusante)  Vento Cruzado  Sombra da torre (montante)	 Forças gravitacionais  Forças giroscópicas
	Carregamento não-cíclico	 Vento Turbulento	

Figura 3-3: Cargas atuantes no rotor das pás. Fonte: Letcher (2017)

Em suma, pode-se resumir as informações da Figura 3-3 como segue:

- **Cargas constantes:** Cargas aerodinâmicas juntamente com a força centrífuga, geram cargas estacionárias independentes do tempo, desde que o rotor esteja funcionando a uma velocidade constante.
- **Cargas aerodinâmicas cíclicas:** Um fluxo de ar constante, mas especialmente não uniforme sobre a área varrida pelo rotor, provoca mudanças cíclicas de carga nas pás. Isto inclui, em particular, o fluxo irregular em direção ao rotor devido ao aumento na velocidade do vento com a altura (visto que o perfil do vento varia com a altura e o diâmetro do rotor pode muitas vezes ultrapassar 60 m), o fluxo cruzado em direção ao rotor, e interferência devido ao fluxo ao redor da torre.

- **Cargas inerciais cíclicas:** As forças de inércia devido ao peso próprio das pás do rotor também causam cargas que são periódicas e, portanto, cíclicas. Além disso, as forças giroscópicas produzidas quando o rotor é guiado no sentido fora do plano devido a rotação das pás devem ser incluídas entre aquelas que aumentam ou se alternam com a rotação das pás do rotor.
- **Cargas aerodinâmicas não-cíclicas** Além das cargas de estado estacionário e de mudança cíclica, o rotor é submetido a cargas estocásticas não periódicas causadas pela turbulência do vento.

Como já dito anteriormente, não é possível reconhecer de antemão quais das cargas dentro de toda a faixa de cargas serão dominantes. Entretanto, como é o caso em todas as estruturas, quanto maior a turbina, maior a influência das cargas gravitacionais. Além disso, a elasticidade da estrutura desempenha um papel crescente à medida em que as cargas externas são transformadas em tensões estruturais.

Em outras palavras: além das cargas externas, a tensão nos materiais também é determinada pelo projeto da turbina eólica, visto que essa depende do módulo de elasticidade. Como já dito, é verdade que quanto mais flexíveis forem as estruturas, melhor a absorção das cargas dinâmicas, assim, a fadiga do material pode ser reduzida, mas em contrapartida, a flexibilidade da estrutura causa problemas de deslocamento. Desta forma, é importante agora, depois de se resumir as cargas, categorizá-las, detalhar sua origem e grau de influência em cada projeto. Posteriormente serão definidas as cargas que serão consideradas nesta dissertação.

3.4 Características das cargas analisadas separadamente

O conjunto de carregamentos agindo em toda a turbina eólica torna-se compreensível apenas quando a carga total é desmembrada em componentes cujas origens são independentes umas das outras. Isto aplica-se tanto às cargas devidas às forças aerodinâmicas como às resultantes de forças gravitacionais e inerciais. No que diz respeito às cargas aerodinâmicas, a ação dessas é determinada pelas condições de fluxo variáveis que atuam nas pás do rotor. Estudará-se a seguir as principais cargas presentes nos aerogeradores de maneira individual.

3.4.1 Cargas Gravitacionais e Inerciais

As cargas gravitacionais e inerciais são aquelas provenientes do peso próprio e também da física do movimento dos aerogeradores como as cargas centrífuga e giroscópica.

Enquanto a carga aerodinâmica é bastante complexa de ser calculada, as cargas gravitacionais e inerciais são relativamente simples. A única dificuldade é na fase de projeto, em que as massas dos componentes não são conhecidas sendo inevitáveis iterações para determinação dessas incógnitas. As primeiras suposições sobre o peso são mais bem obtidas a partir de dados empíricos, preparados estatisticamente a partir de turbinas existentes.

3.4.2 Cargas Gravitacionais

Cargas gravitacionais são, obviamente, as cargas resultantes do peso próprio dos componentes. Naturalmente, elas devem ser levadas em consideração para todos os componentes da turbina. Em uma turbina eólica, o peso da pá do rotor é de especial importância tanto para as próprias pás, como para os outros componentes como a torre.

O peso da pá do rotor gera forças de tração, compressão e também momentos de flexão alternados ao longo de uma rotação do rotor. A intensidade desta carga gravitacional aumenta desde a ponta da pá até à sua base fixa no rotor, isto é, na direção oposta à influência das cargas aerodinâmicas. Esta carga cíclica e particularmente os momentos de flexão periódicos em torno do eixo da pá ocorrem de 10^7 a 10^8 vezes durante a vida de uma turbina - assumindo uma velocidade de rotor de 10 a 20 rpm e uma vida útil de 20 a 30 anos. Para se ter uma noção do nível de fadiga proveniente da alternância de tensões, um número de 10^6 ciclos de carga, por exemplo, é alcançado após apenas aproximadamente 1000 horas de tempo de operação. O mais impressionante é que a partir desse número de ciclos, o aço, por exemplo, só pode ser estressado com cargas abaixo da carga de fadiga admissível.

Assim, juntamente com a turbulência do vento, a influência das forças gravitacionais torna-se o fator dominante para a resistência à fadiga das pás do rotor. Quanto maiores os rotores, mais importantes serão as cargas gravitacionais. Para rotores de eixo horizontal, a situação é agravada pelo fato de que o peso próprio causa cargas alternadas. Os defensores do conceito de turbinas de eixo vertical, portanto, apontam corretamente que, por essa razão em

particular, o rotor de eixo vertical é mais adequado para dimensões extremas, pois as cargas alternadas causadas pelo peso próprio das pás do rotor são evitadas.

3.4.3 Carga centrífuga

A força centrífuga é aquela proveniente da rotação das pás e como próprio nome sugere, sua direção é sempre externa, ou seja, do centro do rotor para a ponta da pá. Elas não são muito significativas nos aerogeradores de baixa velocidade de rotação, e podem, com uma adaptação especial, até serem usadas para aliviar a carga nas pás do rotor. Em alguns rotores, as pás do rotor estão inclinadas a favor do vento para fora do plano de rotação, numa forma ligeiramente em forma de V. Este chamado ângulo de cone das pás do rotor tem o efeito de que as forças centrífugas, além das forças de tração, criam uma distribuição dos momentos fletores ao longo do comprimento da pá, o que combate, mesmo que parcialmente, os momentos de flexão criados pelo impulso aerodinâmico. No entanto, a compensação só pode ser obtida para uma única velocidade de rotor e uma única velocidade do vento.

Se o rotor estiver sujeito a outras condições de vento, o efeito do ângulo do cone pode ser invertido. Quando os ângulos de ataque aerodinâmicos são negativos, por exemplo, com uma queda repentina na velocidade do vento, ou arremesso rápido das pás (parada de emergência do rotor), a direção do impulso pode ser revertida por um curto período de tempo para que os momentos de flexão devido as forças aerodinâmica e centrífuga combinam. Se um ângulo de cone da pá do rotor faz ou não sentido tecnicamente só pode ser avaliado depois de se levar em consideração vários aspectos. Em turbinas mais recentes, a tendência é se ter rotores sem ângulo de cone.

3.4.4 Cargas giroscópicas

O fenômeno giroscópico é resultado de uma combinação de dois efeitos dinâmicos fundamentais. O primeiro é a gravidade e o outro é o momento angular. O efeito giroscópico requer que uma roda esteja geralmente girando em altas rotações por minuto em torno de um eixo de rotação. Em tal condição, a massa de cada partícula que forma a roda está sendo constantemente compelida a mudar sua posição no espaço a velocidades variadas, dependendo de sua posição na roda em relação à circunferência. Nestas circunstâncias, a roda desenvolve um disco como campo de força, ou seja, ela tende a girar em torno do seu eixo (Figura 3-4).

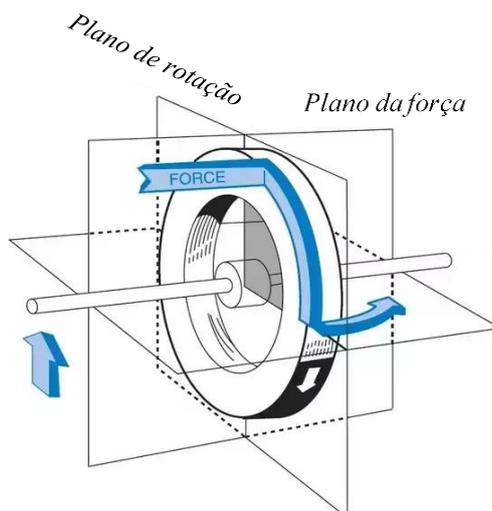


Figura 3-4: Força giroscópica. Fonte: Teng *et al.* (2015)

Nos aerogeradores as rotações são normalmente baixas, os efeitos práticos são muito leves. Deste modo, seria antieconômico ter que dimensionar a estrutura para as forças giroscópicas.

Entretanto, pode ocorrer que a frequência de torção da torre seja excitada pelo movimento giroscópico; porém, seria algo excepcional. Outra situação que os efeitos giroscópicos podem interferir é quando a direção do vento muda rapidamente, assim, é inevitável que o rotor também tenha sua direção desviada rapidamente. Nestas condições, as pás do rotor são submetidas a cargas de flexão devido às forças giroscópicas envolvidas. Mudanças bruscas de direção do vento são esperadas acima de tudo durante baixas velocidades do vento. Portanto, quando algumas dessas condições possuem uma boa probabilidade de acontecer, é interessante se estudar o movimento giroscópico, caso contrário isso não é necessário.

3.5 Normas nacionais e internacionais

As primeiras tentativas de uma definição sistemática para as hipóteses e casos de carga para turbinas eólicas modernas foram realizadas nos anos 80 em conexão com o desenvolvimento das grandes turbinas experimentais Growian e WKA-60. Os padrões foram desenvolvidos inicialmente em bases nacionais, mas as informações foram trocadas especialmente sob a recomendação da Agência Internacional de Energia (AIE), no início dos anos 80. A instituição alemã Germanischer Lloyd usou isso como base para construir seu conjunto de regulamentações, o que representa uma base importante para muitos desenvolvimentos de turbinas eólicas até os dias atuais. Ao mesmo tempo, normas semelhantes também foram

produzidas nos EUA, na Dinamarca e na Suécia. Foi somente em 1988 que a Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) assumiu esta tarefa em escala internacional.

Atualmente, as normas e regulamentos de cada país foram amplamente substituídos pelas normas da IEC, embora as normas nacionais ainda existam. Neste contexto, um olhar lateral para os regulamentos nacionais de construção é por vezes ainda necessário.

Até o momento, os seguintes regulamentos foram publicados pelo IEC:

- IEC 61400-1 Safety Requirements – *“Requisitos de segurança.”*
- IEC 61400-2 Safety Requirements of Small Wind Turbines – *“Requisitos de segurança de pequenas turbinas eólicas.”*
- IEC 61400-3 Design Requirements for Offshore Wind Turbines – *“Requisitos de projeto para turbinas eólicas offshore.”*
- IEC 61400-11 Acoustic Noise Measurement Techniques – *“Técnicas de Medição de Ruído Acústico.”*
- IEC 61400-12 Wind Turbine Performance Testing – *“Teste de Desempenho da Turbina Eólica.”*
- IEC 61400-121 Power Performance Measurements of Grid Connected Wind Turbines – *“Medições de desempenho de potência de turbinas eólicas conectadas à rede.”*
- IEC 61400-13 Measurement of Mechanical Loads – *“Medição de Cargas Mecânicas.”*
- IEC 61400-21 Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines – *“Medição e Avaliação de Características de Qualidade de Energia de Turbinas Eólicas Conectadas à Rede.”*
- IEC 61400-23 Full Scale Structural Testing of Rotor Blades – *“Teste estrutural de escala completa das pás do rotor.”*
- IEC 61400-24 Lightning Protection - *“Proteção contra raios.”*
- IEC 61400-25 Communication Standard of Control and Monitoring of Wind Power Plants – *“Padrão de Comunicação de Controle e Monitoramento de Usinas Eólicas”*

Com base nas normas da IEC, as chamadas Organizações de Certificação oferecem um serviço de certificação independente para turbinas eólicas. Eles também consideram, até

certo ponto, normas nacionais ou internas para alguns aspectos do projeto ou para os cálculos de carga. As organizações de classificação mais importantes, que concedem certificações para turbinas eólicas são:

- **Germanischer Lloyd (G.L.)**

As diretrizes Germanischer Lloyd (*GL*) são de particular importância na Alemanha, entretanto há alguns outros países europeus que também utilizam as diretrizes ou a certificação *GL*. As regras são mais detalhadas que as do IEC em alguns aspectos e também incluem regras para os métodos matemáticos a serem utilizados. Do ponto de vista do conteúdo, há algumas diferenças a serem observadas. Por exemplo, a intensidade da turbulência a ser assumida, que forma a base dos casos de carga, é diferente. Enquanto o IEC está assumindo intensidades de turbulência de 15-18%, as diretrizes do GL exigem 20% no total. No entanto, estes e alguns outros pequenos desvios estão prestes a ser corrigidos.

- **Det Norske Veritas (DNV)**

Ao lado do Germanischer Lloyd, a Det Norske Veritas (*DNV*) é a segunda empresa internacional de classificação. A *DNV* também publicou "Diretrizes para o Projeto de Turbinas Eólicas". Em princípio, o mesmo se aplica às diretrizes GL, ou seja, ainda há alguns desvios da IEC 61400-1. Além das normas IEC, algumas normas nacionais ainda estão em vigor, particularmente as normas na Holanda, Dinamarca e Alemanha. Eles desempenham um papel nas permissões de construção nacional. Alguns regulamentos das normas nacionais não estão incluídos nas normas da IEC.

4 MODELO

Nesta seção inicia-se a apresentação do modelo que representa uma turbina eólica real e a partir desse se fazer as análises necessárias.

4.1 Modelo - Aerogerador

Para a definição do modelo a partir do qual as análises deste trabalho foram feitas, vários estudos foram levados em consideração. Analisaram-se os trabalhos de: Murtagh *et al.* (2008), Harte *et al.* (2012), Staino e Basu (2013), Fitzgerald *et al.* (2014), Fitzgerald e Basu (2016), Zhang *et al.* (2016), e Zuo *et al.* (2018). Todos estes trabalhos utilizaram modelos com múltiplos graus de liberdade, mas cada um com suas peculiaridades.

Para se adaptar um padrão a partir destes já utilizados, alguns parâmetros de escolha foram definidos, sendo estes: modelo de possível solução sem grande custo computacional, abordagem matemática conhecida, parâmetros para o estudo da interação solo-estrutura (ISE), possibilidade do estudo do movimento das pás e torre nas duas direções principais, e possibilidade do estudo da influência da velocidade de rotação das pás. Deste modo, analisando todos estes requisitos o modelo de turbina eólica escolhido para ser estudado nesta dissertação foi adaptado principalmente a partir de Fitzgerald e Basu (2016) e Harte *et al.* (2012).

A partir dos modelos de Fitzgerald e Basu (2016) e Harte *et al.* (2012), dois modelos foram extraídos e ajustados de modo a serem adequados para se investigar os objetivos propostos desta dissertação. O primeiro modelo foi desenvolvido usando pás rotativas modeladas como vigas contínuas. Todo o modelo possui 8 graus de liberdade. As pás são analisadas como um sistema de dois graus de liberdade, isto é, é possível vibrar nas direções *no-plano* e *fora-do-plano*. Elas estão ligadas no centro a *torre+nacelle* representada por uma *massa+mola* correspondente a um sistema de dois graus de liberdade, ou seja, pode também ter vibrações *no-plano* e *fora-do-plano* (Figura 4-1).

Pela Figura 4-1, percebe-se também que todo o modelo está sobre roletes, isso significa que o movimento que o grau de liberdade da massa M_n é apenas do topo da torre sendo esse transferido para o rotor apenas horizontalmente, para as duas direções, *no plano* e *fora-do-*

plano. Isso resulta do fato de não se considerar a flexibilidade da torre neste modelo, desta forma não há movimentos na vertical.

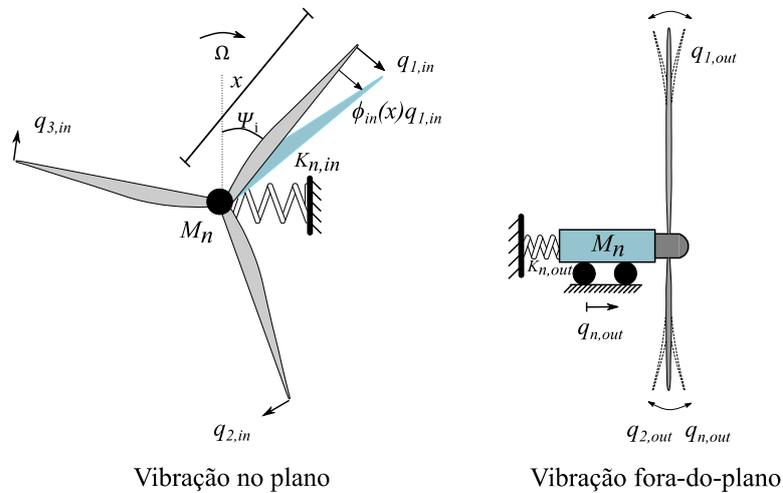


Figura 4-1: Modelo de 8 graus de liberdade e fundação engastada. Fonte: Fitzguald e Basu (2016) adaptado.

O segundo modelo possui as mesmas características do modelo 1, no entanto é incluído nele uma fundação modelada como uma mola com rigidez rotacional bidirecional, desta forma é possível, a partir deste modelo, se estudar a ISE nas duas direções (no-plano e fora-do-plano), como pode ser visto na Figura 4-2. Com os dois graus de liberdade adicionados ao modelo 1, o segundo modelo possui ao todo 10 *G.L.*

É importante ressaltar que para o segundo modelo (Figura 4-2) a torre não é flexível, ela apenas gira como movimento de corpo rígido. Nota-se assim que apenas há movimento horizontal, ou seja, o giro da torre gera um deslocamento na abcissa 'x' no topo da torre e essa diferença em 'x' entre a posição inicial do topo da torre e posição desse após o giro que é acrescida no grau de liberdade M_n . Desse modo, o giro da torre impõe um deslocamento de topo que é acrescido no grau de liberdade M_n e conseqüentemente em todo rotor. Assim, o modelo 2 pode ser estudado como o primeiro modelo acrescido do deslocamento de topo da torre devido a flexibilidade do solo que faz a torre rotacionar mais acentuadamente.

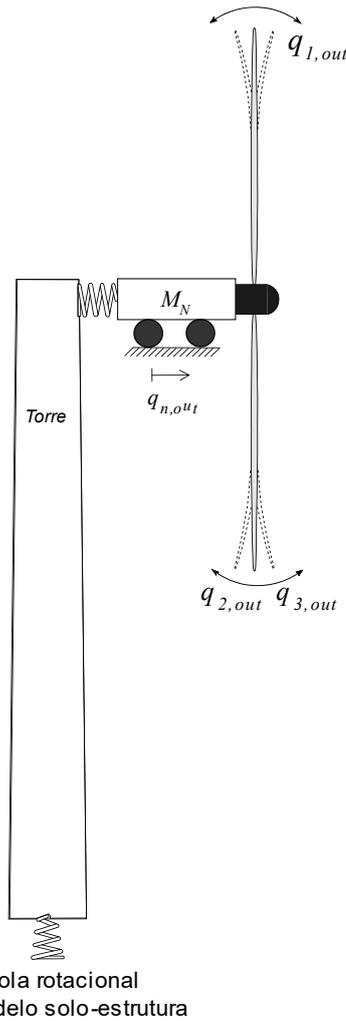


Figura 4-2: Modelo aerogerador considerando a ISE. Fonte: Fitzguald e Basu (2016) adaptado.

O modelo consiste, como dito anteriormente, em três pás tratadas como vigas de rotativas de comprimento L , com rigidez de flexão $EI(x)$ e massa $\mu(x)$. As pás estão rotacionando a uma velocidade Ω constante em torno do eixo do rotor, isto é, a velocidade de rotação não varia em função do tempo. O ângulo azimutal $\psi_i(t)$ da pá "i" no instante do instante "t" é dado pela Equação (4-3). O azimute 0° corresponde à pá na posição vertical.

$$\Psi_i = \Omega t + \frac{2\pi}{3}(i-1) \quad (4-1)$$

Como pode ser visto na Figura 4-1 e Figura 4-2, as vibrações no plano e fora do plano das pás são definidas utilizando-se dois graus de liberdade, $q_{i,in}(t)$ e $q_{i,out}(t)$. Os modos de vibração *no-plano* e *fora-do-plano*, $\phi_{in}(x)$ e $\phi_{out}(x)$, devem ser normalizados, a fim de que $q_{i,in}(t)$ e $q_{i,out}(t)$ representem os deslocamento na ponta da pá, no-plano e fora-do-plano respectivamente.

Na formulação do modelo, é assumido que os deslocamentos no plano e fora do plano, para qualquer x ao longo da pá, representado por $u_{i,in}(x,t)$ e $u_{i,out}(x,t)$, são respectivamente dadas em termos dos modos de vibração fundamental das pás, como mostrados nas Equações (4-2) e (4-3).

$$u_{i,in}(x,t) = \phi_{in}(x)q_{i,in}(t) \quad (4-2)$$

$$u_{i,out}(x,t) = \phi_{out}(x)q_{i,out}(t) \quad (4-3)$$

Como pode ser visto, o cálculo do deslocamento é dependente dos modos de vibração fundamental das pás. Assim, para se dar início ao desenvolvimento do modelo analítico é necessário se obter a função que melhor descreve o modo de vibração da pá.

De acordo com o Clough e Penzien (2013), para se obter uma equação que represente o modo de vibração da pá, pode-se primeiramente modelar a pá utilizando-se de software em elementos finitos, e, em seguida se fazer uma análise dinâmica para vibração livre. Obtendo-se os valores de deslocamento para o primeiro modo de vibração, faz-se uma aproximação para uma função polinomial que aproximará a função de forma da pá.

No entanto, para este trabalho, não foi necessário proceder dessa forma, visto que os dados das funções de forma para a pá utilizada no modelo foram fornecidas por (Fitzgerald e Basu, 2016). Deste modo, tem-se $\phi_{in}(\bar{x})$ e $\phi_{out}(\bar{x})$ expressos nas Equações (4-4) e (4-5)). As funções de forma não dependem das propriedades e sim do formato das pás.

$$\phi_{in}(\bar{x}) = -0,6893 \cdot \bar{x}^6 + 2,3738 \cdot \bar{x}^5 - 3,6043 \cdot \bar{x}^4 + 2,5737 \cdot \bar{x}^3 + 0,3461 \cdot \bar{x}^2 \quad (4-4)$$

$$\phi_{out}(\bar{x}) = -2,4766 \cdot \bar{x}^6 + 5,1976 \cdot \bar{x}^5 - 3,4820 \cdot \bar{x}^4 + 1,7085 \cdot \bar{x}^3 + 0,0525 \cdot \bar{x}^2 \quad (4-5)$$

Em que:

$$\bar{x} = x / L$$

L = comprimento da pá.

A Figura 4-3 ilustra as $\phi_{in}(\bar{x})$ e $\phi_{out}(\bar{x})$ da pá do modelo, utilizada neste trabalho. Nota-se que por se ter uma inércia maior na direção fora do plano, a deformação é mais próxima de uma reta, ou seja, a curva da função é menos acentuada.

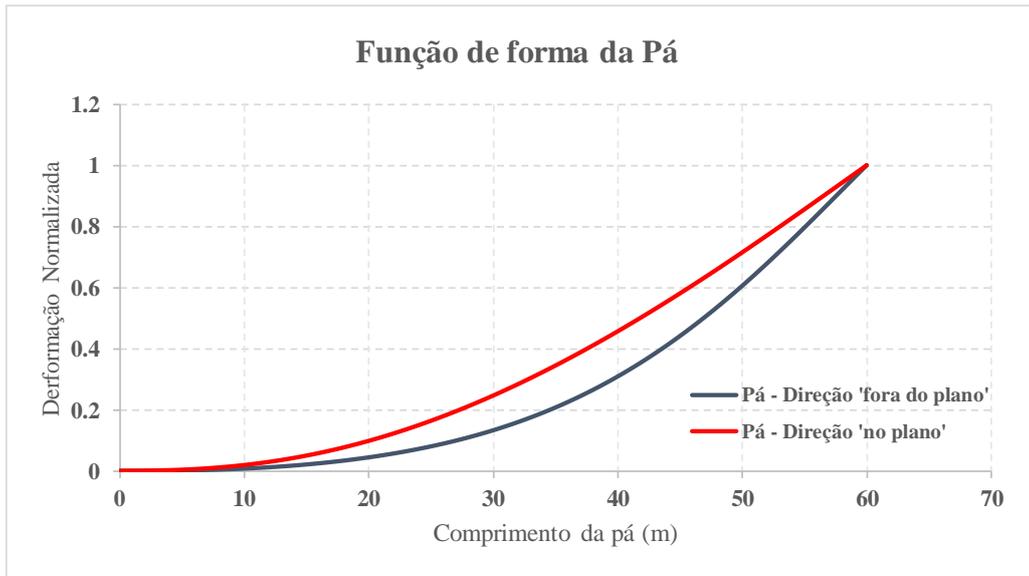


Figura 4-3: Função do primeiro modo de vibração da pá para as duas direções.

Para o modelo, além do deslocamento, é interessante se conhecer também a variação do ângulo a partir do deslocamento. De acordo com Clough e Penzien (2013), essa variação pode ser expressa pelas Equações (4-6) e (4-7).

$$\theta_{i,in} = \frac{\partial u_{i,in}}{\partial x} \quad (4-6)$$

$$\theta_{i,out} = \frac{\partial u_{i,out}}{\partial x} \quad (4-7)$$

(Obs.: Considerando sempre que o subscrito i se refere às pás (i = 1, 2 e 3), o subscrito n refere-se à torre, e os subscritos in e out referem-se aos deslocamentos no-plano (in-plane) e fora-do-plano (out-of-plane), respectivamente.)

4.2 Propriedades

Definidos as variáveis do modelo e suas características é necessário também, antes de se iniciar a fundamentação matemática que se descreve o modelo do aerogerador, se definir as propriedades do mesmo a partir de dados de uma turbina real.

Para as pás, os dados utilizados para a rigidez e inércia variáveis ao longo do comprimento fora extraídos do trabalho de Sun e Jahangiri (2018) e são apresentadas no Anexo A.

As propriedades do modelo para as pás, nacele e torre foram tomadas de uma turbina eólica NREL de 5 MW com 3 pás como pode ser vista na Tabela 4-1 (ZUO *et al.*, 2018).

Tabela 4-1: Propriedades do modelo. Fonte: Zuo *et al.* (2018)

NREL 5MW - Propriedades		
Descrição geral	Máxima potência nominal	5MW
	Orientação do rotor	Upwind, 3 pás
Pá	Diâmetro do rotor	126 m
	Altura do Hub	90 m
	Velocidade do rotor:	
	cut-in, nominal e cut-out	6,9 rpm; 12,1 rpm e 20 rpm
	Comprimento	61,5 m
	Massa Total (integrada)	17740 kg
Hub e Nacele	Diâmetro (<i>hub</i>)	3 m
	Massa (<i>hub</i>)	56.780 kg
	Massa (<i>nacele</i>)	240.000 kg
Torre	Altura	87,6 m
	Massa	347.460 kg
	Amortecimento estrutural	1%

4.3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Para obter as equações de movimento que descrevem os modelos (

Figura 4-1 e Figura 4-2), foi utilizada a teoria de energia mínima, que pode ser deduzida a partir da mecânica de Euler-Lagrange.

O elemento central da mecânica de Euler-Lagrange é encontrar a função que resume a dinâmica de todo o sistema em um conjunto de expressões simples. A análise de um sistema é reduzida escolhendo o conjunto mais conveniente de coordenadas generalizadas e

determinando as energias potencial (V) e cinética (T) dos constituintes do sistema. Obtendo estas equações T e V , pode-se então substituir estes dados dentro da equação de Lagrange (Eq. (4-8)) e está retorna o lagrangeano, que é o conjunto das equações de movimento do sistema.

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i \quad (4-8)$$

Assim, para definir a equação do movimento dos sistemas através da equação de Euler-Lagrange, é necessário primeiro definir as equações das energias potencial e cinética o que será feito nos próximos tópicos.

4.3.1 ENERGIA POTENCIAL

Para a análise da energia potencial o critério adotado foi baseado em Hansen (2015), qual é sugerido que a energia potencial total de um modelo de aerogerador (V) deve ser obtida considerando a energia potencial da pá na flexão, a contribuição da força centrífuga, a contribuição a partir do componente da gravidade ao longo do eixo da pá e a energia potencial da nacelle. Deste modo, estas serão as equações de energia que serão derivadas a seguir.

1. Energia potencial da pá na flexão

A energia de um membro devido deformação é definida como o trabalho interno realizado na deformação do corpo pela ação de forças aplicadas externamente. No caso aqui estudado se quer calcular a energia devido á flexão, sendo assim o elemento do modelo que estará submetida a forças fletoras são as pás que podem ser aproximadas como vigas (HARTE *et al.*, 2012).

Antes do cálculo da energia propriamente dito, é necessário se demonstrar a equação de deflexão de uma viga, afinal de contas é a partir do trabalho interno proveniente da deflexão gerado pela carga fletora que se obtêm a energia.

➤ *Deflexão de uma viga*

A maioria dos procedimentos para encontrar deflexões de vigas baseia-se nas equações diferenciais da curva de deflexão e suas relações associadas. Por conseguinte, começa-se por

demonstrar a equação básica pela curva de deflexão de uma viga, para isso considera-se a viga da

Figura 4-4.

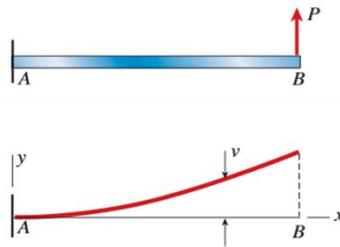


Figura 4-4 - Deflexão de uma viga ao longo do seu comprimento.

Para obter a equação da curva de deflexão, deve-se expressar a deflexão v como uma função da coordenada x . A deflexão v em qualquer ponto m_1 da curva de deflexão é mostrada na Figura 4-5. O ponto m_1 está localizado na distância x da origem (medida ao longo do eixo x). Um segundo ponto m_2 , localizado na distância $x + dx$ da origem, também é mostrado. A deflexão neste segundo ponto é $v + dv$, em que dv é o incremento na deflexão conforme se move ao longo da curva de m_1 para m_2 .

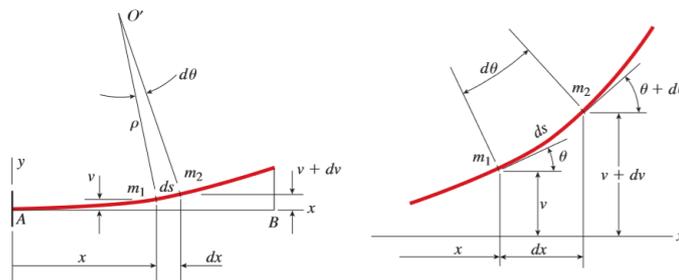


Figura 4-5 - Curva de deflexão de uma viga.

Quando a viga é flexionada, não há apenas uma deflexão em cada ponto ao longo do eixo, mas também uma rotação. O ângulo de rotação θ do eixo da viga é o ângulo entre o eixo x e a tangente à curva de deflexão, como mostrado para o ponto m_1 na vista ampliada da Figura 4-5.

O ângulo de rotação no ponto m_2 é $\theta + d\theta$, em que $d\theta$ é o aumento do ângulo à medida que se move do ponto m_1 para o ponto m_2 . Segue-se que, se construir linhas normais às tangentes (Figura 4-5), o ângulo entre essas normais é $d\theta$. Além disso, o ponto de intersecção dessas normais é o centro de curvatura O' e a distância de O' para a curva é o raio de curvatura ρ . Da Figura 4-5 pode-se obter a Equação (4-9); em que $d\theta$ está em radianos e ds é a distância ao longo da curva de deflexão entre os pontos m_1 e m_2 .

$$\rho d\theta = ds \quad (4-9)$$

Portanto, a curvatura k (igual ao recíproco do raio de curvatura) é dada pela Equação (4-10).

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} \quad (4-10)$$

Considere, por exemplo, a curva de deflexão mostrada na Figura 4-5. Se o ângulo de rotação θ é um valor muito pequeno (e, portanto, a curva de deflexão é quase horizontal), vemos imediatamente que a distância ds ao longo da curva de deflexão é praticamente igual ao incremento dx ao longo do eixo x , assim tem-se $ds \approx dx$. Com esta aproximação, a curvatura se torna como a Equação (4-11) apresenta.

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dx} \quad (4-11)$$

Além disso, como $\tan \theta = \theta$ quando θ é pequeno, pode-se fazer a aproximação apresentada na Eq. (4-12).

$$\theta \approx \tan \theta = \frac{dv}{dx} \quad (4-12)$$

Assim, se as rotações da viga forem pequenas, podemos assumir que o ângulo de rotação θ e a inclinação dv/dx são iguais. (Note que o ângulo de rotação deve ser medido em radianos). Tomando a derivada de θ em relação a x na Eq. (4-12), tem-se a Eq. (4-13).

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2v}{dx^2} \quad (4-13)$$

Combinando a Eq. (4-11) e a Eq. (4-13) obtêm-se uma relação entre a curvatura de uma viga e sua deflexão (Eq. (4-14)).

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{d^2v}{dx^2} \quad (4-14)$$

A Equação (4-14) é válida para uma viga de qualquer material, desde que as rotações sejam pequenas. Se o material de uma viga é linearmente elástico e segue a lei de Hooke, a

curvatura é escrita como mostrado na Eq. (4-15); em que M é o momento de flexão e EI é a rigidez de flexão da viga.

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (4-15)$$

Combinando a Equações (4-13), (4-14) e (4-15), tem-se a equação diferencial básica da curva de deflexão de uma viga (Eq.(4-16))

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (4-16)$$

➤ **Energia devido à flexão de uma viga**

Após a obtenção das equações de deflexão da viga, pode-se agora iniciar uma abordagem para o cálculo da energia devido à flexão de uma viga. A discussão sobre energia de deformação só se aplica a vigas que se comportam de forma linear elástica. Este requisito significa que o material deve seguir a lei de Hooke e as deflexões e rotações devem ser pequenas.

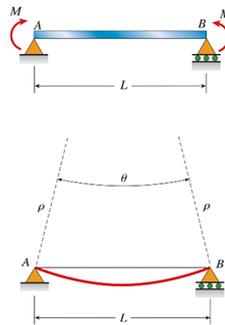


Figura 4-6 - Raio de curvatura.

Analisando-se uma viga sob flexão pura gerada por dois momentos M aplicados nas extremidades (Figura 4-6). De maneira que a curva de deflexão é um arco circular quase plano de curvatura constante k (Eq.(4-14)) e o ângulo θ subtendido por este arco é igual a L/ρ , em que L é o comprimento da viga e ρ é o raio de curvatura. Esta relação linear entre os momentos M e o ângulo θ é desenvolvida na Eq. (4-17) e mostrada graficamente pela linha OA na Figura 4-7.

$$\theta = \frac{L}{\rho} = kL = \frac{ML}{EI} \quad (4-17)$$

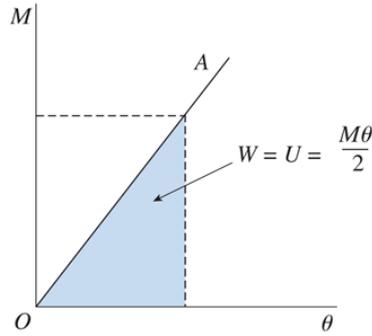


Figura 4-7 - Relação linear entre o momento e o ângulo.

À medida que os momentos aumentam gradualmente em magnitude de zero até seus valores máximos, eles executam um trabalho W representado pela área sombreada abaixo da linha OA . Este trabalho, igual à energia de tensão U armazenada na viga, é descrito pela Eq. (4-18).

$$W = dU = \frac{1}{2} M d\theta \quad (4-18)$$

Sabendo-se, a partir da Eq. (4-16), que $d\theta$ pode ser escrito como a mostrado na Equação (4-18). Partindo-se da Eq. (4-18), e substituindo-a na Eq. (4-17), obtêm-se a Equação (4-19).

$$d\theta = \frac{1}{\rho} ds = \frac{M}{EI} ds \quad (4-19)$$

$$dU = \frac{1}{2} \frac{M^2}{EI} ds \quad (4-20)$$

Integrando-se então a Eq. (4-20) e considerando $ds \approx dx$, tem-se a Equação (4-21) que apresenta a energia proveniente do trabalho interno realizado na deformação do corpo pela ação de forças aplicadas externamente.

$$U = \int_0^L \frac{1}{2} \frac{M^2}{EI} dx \quad (4-21)$$

Como demonstrado anteriormente, o momento pode ser escrito como a Eq. (4-22).

$$M(x) = EI(x) \frac{\partial \theta_i}{\partial x} \quad (4-22)$$

Assim, substituindo a Eq. (4-22) na Equação (4-21), pode-se obter uma equação para a energia que depende da rigidez a flexão (EI) e da variação angular de θ (Equação (4-23)).

$$U = \int_0^l \frac{1}{2} \left(EI(x) \frac{\partial \theta_i}{\partial x} \right)^2 \frac{1}{EI} dx \rightarrow U = \frac{1}{2} \int_0^l EI(x) \left(\frac{\partial \theta_i}{\partial x} \right)^2 dx \quad (4-23)$$

2. Energia acrescida devido à força centrífuga

Nesta seção de estudo é avaliado a energia devido á força centrífuga, sendo assim o primeiro passo é se calcular qual o valor dessa força para assim se calcular o acréscimo de energia gerado por ela.

➤ *Força Centrífuga*

A força pode ser definida como a força aparente, igual e oposta à força centrípeta, puxando o corpo em rotação para longe do centro de rotação, sendo assim causada pela inércia do corpo. No da turbina eólica a força centrífuga age nas pás, pois à medida que estas iniciam seu processo de rotação, surge então está força.



Figura 4-8 - Força centrífuga.

Para iniciar o desenvolvimento da equação que calcula a magnitude da força centrífuga agindo sobre as pás, pode-se utilizar o conceito da segunda lei de Newton (Eq. (4-24)).

$$F = m \cdot a \quad (4-24)$$

Como no caso estudado trata-se de um movimento circular a aceleração utilizada será a centrípeta, que pode ser calculada pela Eq. (4-25).

$$a = \frac{v^2}{r} \quad (4-25)$$

Pode-se reescrever a velocidade tangencial (v) como função da velocidade angular como segue na Eq. (4-26).

$$v = \Omega \cdot x \quad (4-26)$$

Substituindo a Eq. (4-26) na Eq. (4-25) e o resultado desta na Eq. (4-24), obtêm-se assim a Eq. (4-27).

$$F = m \cdot \frac{(\Omega \cdot r)^2}{r} \rightarrow F = \Omega^2 \cdot m \cdot r \quad (4-27)$$

A Eq. (4-27) é uma expressão que calcula somente a força centrífuga final agindo sobre um corpo em movimento circular. Entretanto pode-se escrever esta expressão de uma maneira mais genérica de modo a se permitir o cálculo da força em qualquer ponto da pá. Para isso, primeiramente tem-se que a massa não será mais constante, e pode ser calculada como o somatório de dx multiplicado pela massa específica $\mu(x)$ (Eq. (4-28)).

$$m = \int_x^L \mu(x) dx \quad (4-28)$$

O intervalo de integração da Eq. (4-28) é de x até L , sendo $x=0$ na base da pá e $x=L$ a extremidade da pá. De maneira que a integral é máxima em $x=0$ pois está se considerando a força centrífuga na pá toda. Assim, substituindo a Eq. (4-28) na Eq. (4-27) e considerando $\mu(x)$ constante, obtêm-se a Equação (4-29).

$$N(x) = \Omega^2 \int_x^L (\mu(x) \cdot x) dx \rightarrow N(x) = \Omega^2 \mu(x) \int_x^L (x) dx \quad (4-29)$$

$$N(x) = \Omega^2 \mu(x) \left[\frac{L^2 - x^2}{2} \right]$$

Substituindo $x=0$ na Eq. (4-29) tem-se o valor da força centrífuga máxima (Eq. (4-30)).

$$N(0)_{m\acute{a}x} = \Omega^2 \mu(x) \left[\frac{L^2 - 0^2}{2} \right] \rightarrow N_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} \cdot \Omega^2 \mu(x) L^2 \quad (4-30)$$

➤ **Energia devido à força centrífuga**

A força centrífuga atual na pá como uma ação reconstituente da posição não deformada da pá (Figura 4-9) (ZUO *et. al.*, 2018).

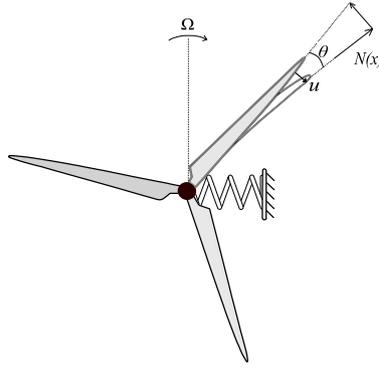


Figura 4-9 - Força centrífuga agindo na pá. Fonte: Fitzgerald e Basu (2016) adaptado.

Analisando a Figura 4-9, percebe-se que a parcela da força centrífuga contribuinte para o aumento de rigidez do sistema é equivalente a $(N(x) \cdot \tan\theta)$. Considerando também que para pequenas deformações $\tan\theta \approx \theta$ pode-se expressar a força centrífuga na Eq. (4-31).

$$F = N(x) \cdot \theta \quad (4-31)$$

Considerando o conceito de energia que é o somatório do trabalho realizado pela força e também que a constante utilizada para designar o deslocamento na pá é a letra u , pode-se encontrar a expressão de energia potencial gerada pela força centrífuga (Eq. (4-32)).

$$U = \frac{1}{2} \cdot F \cdot u \quad (4-32)$$

Escrevendo a Eq. (4-32) de maneira mais geral através da integração ao longo de toda pá, considerando x como o eixo que percorre todo comprimento da pá, e também substituindo $\theta = \partial u / \partial x$, obtêm-se a expressão que magnifica a energia potencial gerado pela força centrífuga (Eq. (4-33)).

$$U = \frac{1}{2} F \cdot u \rightarrow dU = \frac{1}{2} \int (N(x) \cdot \theta) \partial u \left(\frac{dx}{dx} \right) \quad (4-33)$$

$$U = \frac{1}{2} \int (N(x)) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 dx$$

3. Energia devido a força gravitacional

Nesta seção de estudo é calculada a energia devido á força gravitacional, sendo assim o primeiro passo é se calcular qual o valor dessa força para assim se calcular o acréscimo de energia gerado por ela.

➤ **Força gravitacional**

Sabe-se que o sistema aqui estudado é rotativo. Assim sendo, quando busca-se analisar a força da gravidade (peso próprio) que age nas pás deve-se considerar que esta força é variável ao longo do ciclo percorrido por elas. Isto se deve à posição da pá durante a rotação, pois quando estas estão passando na parte inferior do círculo rotativo, a gravidade está agindo nas pás como uma força de tração ou tração e flexão. Exatamente o oposto acontece quando as pás estão na parte superior que forças de compressão ou flexo-compressão estão agindo (Figura 4-10). Quando a gravidade gera nas pás uma força de tração $G(x)$, essa força fornece ao sistema um aumento de energia potencial, o oposto da força de compressão.

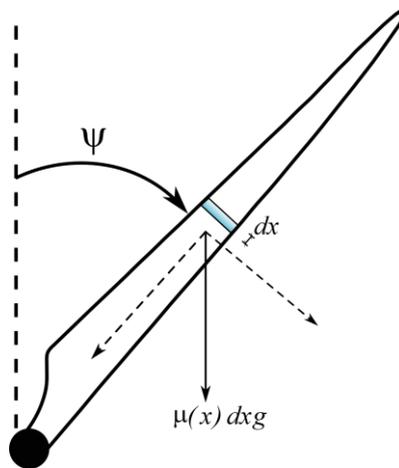


Figura 4-10 - Decomposição da força gravitacional.

Para iniciar o desenvolvimento da equação que calcula a magnitude da força gravitacional agindo sobre as pás, pode-se utilizar o conceito da segunda lei de Newton ($F = m \cdot a$) considerando a massa como uma integral da massa linear vezes o elemento infinitesimal dx ($m = \int \mu(x) dx$) e a aceleração como sendo a gravidade (g).

Pela Figura 4-10 pode-se perceber que a força de tração ou compressão devido a gravidade, e agindo na direção de maior comprimento da pá, varia com o ângulo $\cos(\psi_i)$. Assim, utilizando-se destes dados definidos pode-se obter a força gravitacional.

$$G(x) = g \cdot \cos(\Psi_i) \int (\mu(x)) dx \quad (4-34)$$

O intervalo de integração da Eq. (4-34) é de x até L , sendo $x=0$ na base da pá e $x=L$ a extremidade da pá. De maneira que a integral é máxima em $x=0$ pois está se considerando a pá em sua totalidade. Considerando $\mu(x)$ constante, obtêm-se a Equação (4-35).

$$G(x) = g \cdot \cos(\Psi_i)(\mu(x)) \int_x^L dx \rightarrow G(x) = g \cdot \cos(\Psi_i)(\mu(x)) [x]_x^L \quad (4-35)$$

$$G(x) = g \cdot \cos(\Psi_i) \cdot (\mu(x)) \cdot [L - x]$$

O ângulo ψ_i descreve a posição da pá em relação a um eixo fixo determinado (Figura 4-10), assim dois fatores interferem nesta posição, que são: a velocidade angular de rotação e a pá que está sendo analisada visto que são três pás com ângulo de 120° entre elas. Assim, levando-se em consideração os fatores citados, a expressão que descreve o ângulo ψ_i é definida pela Eq. (4-1).

Analisando a Eq. (4-1), percebe-se que o subíndice i refere-se a pá analisada sendo que se a pá 1 possui ângulo 0° , a pá 2 está na posição 120° e a pá 3 está na posição 240° . Substituindo $x = 0$ na Eq. (4-35) tem-se o valor da força gravitacional máxima (Eq. (4-36)).

$$G(x) = g \cdot \cos(\psi_i) \cdot (\mu(x)) \cdot L \quad (4-36)$$

➤ **Energia devido à força gravitacional**

Como a força gravitacional é uma força agindo nas pás, a mesma análise feita para o cálculo da energia potencial gerada pela força centrífuga pode ser feita para a gravitacional. Assim, substituindo $N(x)$ por $G(x)$ na Eq. (4-33), tem-se energia potencial gerada pela força gravitacional (Eq. (4-37)).

$$U = \int_0^L \frac{1}{2} G(x) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x} \right)^2 dx \quad (4-37)$$

4. Energia elástica da mola acoplada a torre

No modelo analítico estudado, como discutido anteriormente, a torre é considerada como uma massa concentrada juntamente com a nacele. Deste modo, o acoplamento do *rotor+pás* com a nacele se dá através de uma mola, tanto na direção *out-plane* quanto na direção *in-plane* (Figura 4-11). Assim sendo, a única energia potencial armazenada nesta componente do projeto (nacele) é a energia elástica.

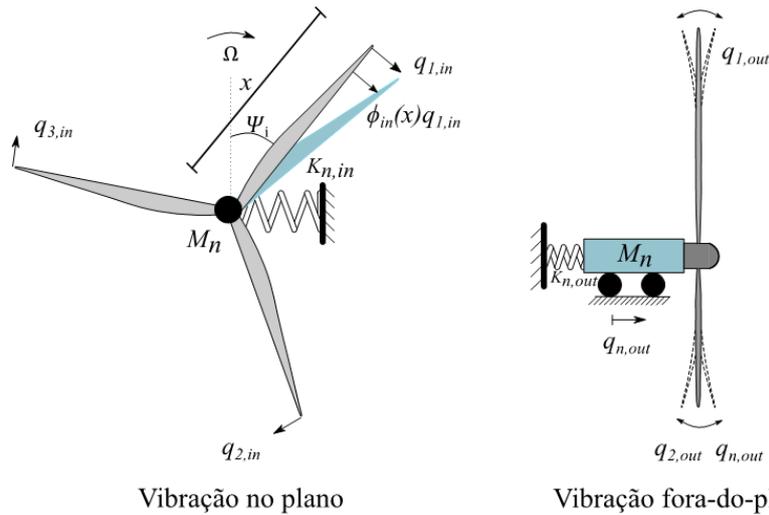


Figura 4-11 - Esquemática do modelo do aerogerador. Fonte: Fitzgerald e Basu (2016) adaptado.

A lei de Hooke é uma lei da física que afirma que a força (F) necessária para estender ou comprimir uma mola em alguma distância x em escala linear. Ou seja: $f = k \cdot x$, em que k é um fator constante característico da mola (sua rigidez) e x é a deformação ocorrida na mola. Considerando também o conceito de energia que é o somatório do trabalho realizado pela força pode-se encontrar a expressão de energia potencial elástica (Eq. (4-38)).

$$dU = k \int_0^L (x) dx \rightarrow U = k \left[\frac{x^2}{2} \right]_0^L \quad (4-38)$$

$$U = \frac{1}{2} kx^2$$

Como definiu-se anteriormente que o deslocamento seria representado pela letra q (ao invés de x) e que o subíndice n representaria parâmetros relacionados a nacele, pode-se reescrever a Eq.(4-38), obtendo-se assim a Eq. (4-39).

$$U = \frac{1}{2} k_n q_n^2 \quad (4-39)$$

5. Lagrangiano – Energia Potencial

Depois de analisar cada termo da energia potencial, é possível formular a o lagrangeano que define a energia potencial total. Para cada uma das quatro partes da energia potencial descrita, é necessário considerar os componentes no plano e fora do plano. Procedendo-se assim, encontra-se a energia potencial total do sistema (Eq. (4-40)).

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \int_0^L \left[EI_{in}(x) \left(\frac{\partial \theta_{i,in}}{\partial x} \right)^2 dx + EI_{out}(x) \left(\frac{\partial \theta_{i,out}}{\partial x} \right)^2 dx + 2EI_{inout}(x) \left(\frac{\partial \theta_{i,in}}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \theta_{i,out}}{\partial x} \right) dx \right. \\ \left. + N(x) \left(\frac{\partial u_{i,in}}{\partial x} \right)^2 dx + N(x) \left(\frac{\partial u_{i,out}}{\partial x} \right)^2 dx + G(x) \left(\frac{\partial u_{i,in}}{\partial x} \right)^2 dx + G(x) \left(\frac{\partial u_{i,out}}{\partial x} \right)^2 dx \right] \\ + \frac{1}{2} k_{n,in} q_{n,in}^2 + \frac{1}{2} k_{n,out} q_{n,out}^2 \quad (4-40)$$

4.3.2 ENERGIA CINÉTICA

A energia cinética total (T) de um sistema mecânico é igual à soma de todas as energias cinéticas de translação e rotação de todas as partes do sistema. Em geral, é uma função que depende de todas as coordenadas, da velocidade e do tempo.

1. Energia Cinética nas pás

É sabido que a energia cinética é igual à metade da soma da multiplicação da massa de um objeto pela sua velocidade ao quadrado. Para o sistema estudado, é necessário primeiramente se definir a velocidade vetorial das pás.

O modelo de turbina eólica descrito neste trabalho considera tanto as vibrações das pás no plano quanto as fora-do-plano sendo estas acopladas. Devido à rotação das pás, o modelo foi formulado usando um vetor de posição com ponto de referência estacionário. O vetor de posição, $r_i(t)$, de um dado ponto, na i -ésima pá, a uma distância de x do centro do hub, tem a representação no sistema de coordenadas rotativas dado pela Eq. (4-41) com os vetores unitários de base $\vec{i}(t)$, $\vec{j}(t)$ e $\vec{k}(t)$.

$$r_i(t) = \left[x + q_{n,in} \sin(\psi_i) \right] \vec{i}(t) \\ + \left[\phi_{in}(x) \cdot q_{i,in} + q_{n,in} \cos(\psi_i) \right] \vec{j}(t) \\ + \left[\phi_{out}(x) \cdot q_{i,out} + q_{n,out} \right] \vec{k}(t) \quad (4-41)$$

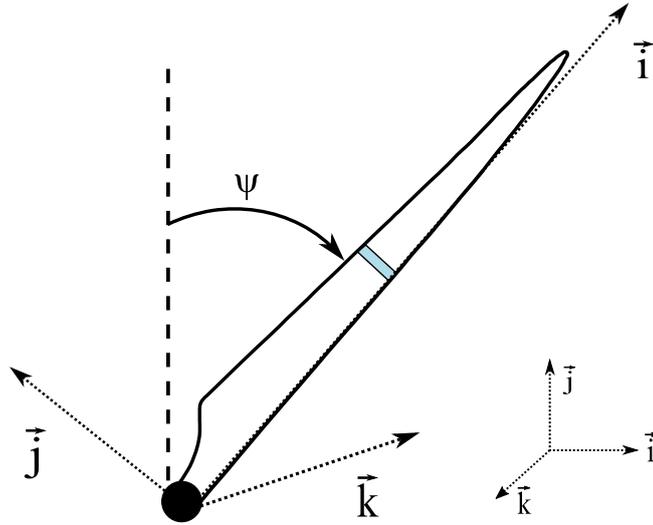


Figura 4-12 - Componente Vetorial.

Como pode ser visto pela Figura 4-12, o vetor $\vec{i}(t)$ tem direção localizada ao longo do comprimento da pá, já o vetor $\vec{j}(t)$ tem direção rotacionada, no plano, em 90 graus em relação ao $\vec{i}(t)$ e, por fim, $\vec{k}(t)$ tem direção rotacionada, fora do plano, em 90 graus em relação ao $\vec{i}(t)$. Assim, a componente do vetor $\vec{i}(t)$ (eixo x) é composta pela distância x mais o deslocamento da pá nesta direção ($q_{n,in} \sin(\psi_i)$). A componente do vetor $\vec{j}(t)$ (eixo y) é composta pela deformada da pá ($\phi_{in}(x) \cdot q_{i,in}$) mais o deslocamento da torre nesta direção ($q_{n,in} \cos(\psi_i)$). Por fim, a componente $\vec{k}(t)$ (eixo z) é basicamente para movimentações fora do plano, composta assim pela deformada da pá ($\phi_{out}(x) \cdot q_{i,out}$) mais o deslocamento da torre nesta direção ($q_{n,out}$). Deste modo, a partir do vetor posição ($r_i(t)$) pode-se encontrar o vetor velocidade ($v_i(t)$), visto que a velocidade é a derivada da posição pelo tempo. O vetor velocidade está expressa na Eq. (4-42).

$$\begin{aligned}
 v_i(t) = \dot{r}_i(t) = & \\
 & [\dot{q}_{n,in} \sin(\psi_i) - \Omega \phi_{in}(x) \cdot q_{i,in}] i(t) \\
 & + [\Omega \cdot x + \phi_{in}(x) \cdot \dot{q}_{n,in} \cos(\psi_i)] j(t) \\
 & + [\phi_{out}(x) \cdot \dot{q}_{i,out} + \dot{q}_{n,out}] k(t)
 \end{aligned} \tag{4-42}$$

Considerando o conceito de energia que é o somatório do trabalho realizado pela força pode-se encontrar uma expressão inicial para o problema (Eq. (4-43)).

$$dT = \int F(r) \cdot dr \rightarrow dT = \int (ma) \cdot dr \quad (4-43)$$

A aceleração pode ser considerada como sendo a variação da velocidade no tempo ($a = dv/dt$). Acrescentando-se isto na Eq. (4-43) tem-se a Eq. (4-44).

$$dT = m \int \left(\frac{dv}{dt} \right) \cdot dr \rightarrow dT = m \int \left(\frac{dr}{dt} \right) \cdot dv \quad (4-44)$$

A variação do espaço no tempo é a definição da velocidade ($v = dr/dt$). Deste modo, pode-se reescrever a Eq. (4-44) obtendo-se a Eq. (4-45).

$$dT = m \int \left(\frac{dr}{dt} \right) \cdot dv \rightarrow dT = m \int v \cdot dv \quad (4-45)$$

$$T = m \left[\frac{v^2 - v_0^2}{2} \right]$$

Portanto, tem-se assim a Eq. (4-45), que é a expressão que calcula a energia cinética de um objeto em movimento.

Desenvolvida a Eq. (4-45), pode-se aplicá-la para o estudo da energia cinética das pás. Nas pás a massa pode ser calculada como uma integral da massa linear vezes o elemento infinitesimal dx ($m = \int \mu(x) dx$). Assim sendo, a partir da Eq. (4-45) pode-se obter a Eq. (4-46).

$$T = \frac{1}{2} v_i^2 \int_0^L \mu(x) dx \quad (4-46)$$

Como o modelo é composto de três pás, pode-se expandir a Eq. (4-46) através de um somatório e utilizando o subíndice i para representar cada pá do modelo (Eq. (4-47)).

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \int_0^L \mu(x) v_i^2 dx \quad (4-47)$$

2. Energia cinética da nacele

Também através da Eq. (4-47), pode-se calcular energia cinética proveniente do movimento da massa da nacele. Como definiu-se anteriormente que o deslocamento seria representado

pela letra q (ao invés de x) e que o subíndice n representaria parâmetros relacionados a nacele, pode-se reescrever a Eq. (4-47) de modo a se obter a Eq. (4-48).

$$T = \frac{1}{2} M_n \dot{q}_n^2 \quad (4-48)$$

3. Lagrangiano – Energia Cinética

Da mesma forma que se analisou cada porção da energia potencial, faz-se para a energia cinética. Assim, é possível formular a equação de energia cinética total. Para o movimento da torre é necessário considerar os componentes no-plano e fora-do-plano. Assim, encontra-se a energia total do sistema (Eq. (4-49)).

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \int_0^L \mu(x) v_i^2 dx + \frac{1}{2} M_n \dot{q}_{n,in}^2 + \frac{1}{2} M_n \dot{q}_{n,out}^2 \quad (4-49)$$

4.3.3 EQUAÇÃO DO MOVIMENTO PARA CADA G.L.

Para encontrar a equação de movimento que descreve cada um dos oito graus de liberdade, é necessário, primeiramente substituir as propriedades da turbina NREL 5MW em cada um dos termos do lagrangeano (Equações (4-49) e (4-40)). Posteriormente, aplica-se a Equação (4-8) inserido nela as Equações (4-49) e (4-40).

Nesta dissertação, o processo de substituir os dados, resolver as integrais das Equações (4-49) e (4-40) e em seguida se resolver a Equação (4-8) foi feito utilizando o software Maple como ferramenta auxiliar.

Posteriormente, foi utilizado o Matlab para resolver as EDOs encontradas e se plotar os gráficos que descrevem o deslocamento das pás e da torre para cada condição estudada. O código desenvolvido no MatLab foi baseado na formulação de matriz de estado utilizada para desacoplar cada termo. No Apêndice A são apresentados os códigos utilizados nesta dissertação.

No Apêndice B, são apresentadas as equações de cada grau de liberdade obtido pela resolução da Eq. (4-8) através do software Maple.

4.3.4 COMPARAÇÃO DO MODELO COM DADOS DA LITERATURA A PARTIR DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS

Este tópico tem como objetivo o desenvolvimento de uma análise modal a partir da abordagem de autovalores e autovetores a fim de se obter as frequências naturais aproximadas do sistema e posteriormente se comparar os resultados obtidos com o já encontrados na literatura. Fazendo-se assim, pode se ter uma boa ideia se os resultados obtidos pelo modelo são satisfatórios conforme Zhang *et al.*, (2016) especifica em seu trabalho.

Obtenção das frequências naturais e modos de vibração.

As equações de movimento para um sistema de vibração livre de vários graus de liberdade são dadas pela Equação (4-50) (CLOUGH E PENZIEN, 2013).

$$[M] \ddot{x} + [C] \dot{x} + [K] x = 0 \quad (4-50)$$

Com o objetivo de simplificar a análise do problema em questão, considera-se este como não amortecido. Isso implica em que a matriz de amortecimento será igual zero e o vetor de cargas aplicadas também por ser uma análise modal.

Desta forma, tem-se um problema de análise de vibração que consiste em determinar as condições sob as quais a condição de equilíbrio expressa pela Eq. (4-50) ficará satisfeito. Por analogia com o comportamento dos sistemas de um grau de liberdade, será assumido que o movimento de vibração livre é harmônico simples, que pode ser expresso para um sistema de múltiplo graus de liberdade como mostrado na Equação (4-51) (CLOUGH E PENZIEN, 2013).

$$\vec{x}(t) = \vec{\hat{x}} \sin(\omega t + \theta) \quad (4-51)$$

Nesta expressão $\vec{\hat{x}}$ representa a forma do sistema (que não muda com o tempo; somente a amplitude varia) e θ é um ângulo de fase. Quando a segunda derivada da Eq. (4-51) é realizada, tem-se que as acelerações na vibração livre são como expresso na Eq. (4-52).

$$\ddot{\vec{x}} = -\omega^2 \vec{\hat{x}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta) = -\omega^2 \vec{x} \quad (4-52)$$

Substituindo as Equações (4-51) e (4-52) na Eq. (4-50) tem-se a Eq. (4-53).

$$-\omega^2 m \cdot \vec{\hat{x}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta) + k \cdot \vec{\hat{x}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta) = -\omega^2 \vec{x} \quad (4-53)$$

Em que uma vez que o termo seno é arbitrário e pode ser omitido, a Eq. (4-53) pode ser reescrita como a Eq. (4-54).

$$\left[[K] - \omega^2 [M] \right] \cdot \vec{\hat{x}} = 0 \quad (4-54)$$

A Equação (4-53) é uma maneira de expressar o que é chamado de problema de autovalor ou valor característico. As grandezas ω^2 são os autovalores ou valores característicos que indicam o quadrado das frequências de vibração livre, enquanto os vetores de deslocamento correspondentes $\vec{\hat{x}}$ expressam as formas correspondentes do sistema vibratório - conhecidas como os autovetores ou formas modais. Agora pode ser demonstrado pela regra de Cramer que a solução deste conjunto de equações simultâneas é da forma expressa na Eq. (4-55).

$$\vec{\hat{x}} = \frac{0}{\|k - \omega^2 m\|} \quad (4-55)$$

Portanto, uma solução não trivial só é possível quando o determinante do denominador desaparece. Em outras palavras, as vibrações livres de amplitude finita só são possíveis quando a Eq. (4-56) é satisfeita.

$$\|k - \omega^2 m\| = 0 \quad (4-56)$$

A Equação (4-55) é chamada de equação de frequência do sistema. A expansão do determinante fornecerá uma equação algébrica do enésimo grau no parâmetro de frequência ω^2 para um sistema com N graus de liberdade. As raízes N desta equação ($\omega_1^2, \omega_2^2, \omega_3^2, \dots, \omega_N^2$) representam as frequências dos N modos de vibração que são possíveis no sistema. O vetor composto de todo o conjunto de frequências modais, organizado em sequência, será chamado de vetor de frequência ω .

$$\omega = \begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_N \end{Bmatrix}$$

Frequências naturais do Modelo 1.

Para se extrair as frequências naturais do sistema a partir da teoria apresentada anteriormente deve-se primeiramente se definir a matriz de massa e rigidez o sistema. Como o modelo a ser estudado é não-linear com massa e rigidez variando com o tempo, definiu-se essas para um $t=0$ e pás estacionadas conforme sugere Zuo *et al.* (2018). Desta forma, as matrizes de rigidez e massa do sistema em movimento e variando com o tempo podem ser simplificados nas matrizes (4-57) e (4-58).

$$K = \begin{bmatrix} 1,43 \cdot 10^{15} & 0 & 0 & 0 & 0,543 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,43 \cdot 10^{15} & 0 & 0 & 0 & 0,543 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,43 \cdot 10^{15} & 0 & 0 & 0 & 0,543 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,165 \cdot 10^9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,543 & 0 & 0 & 0 & 1,43 \cdot 10^{15} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,584 \cdot 10^{23} & 0 & 0 & 0 & 1,43 \cdot 10^{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,584 \cdot 10^{23} & 0 & 0 & 0 & 1,43 \cdot 10^{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,165 \cdot 10^9 \end{bmatrix} \quad (4-57)$$

$$M = \begin{bmatrix} 1,68 \times 10^{24} & 0 & 0 & -8,85 \times 10^{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,68 \times 10^{24} & 0 & 4,426 \times 10^{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,68 \times 10^{24} & 4,426 \times 10^{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -8,85 \times 10^{13} & 4,426 \times 10^{13} & 4,426 \times 10^{13} & 2,478 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,27 \times 10^{25} & 0 & 0 & -3,26 \times 10^{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,27 \times 10^{25} & 0 & 1,63 \times 10^{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,27 \times 10^{25} & 1,63 \times 10^{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -3,26 \times 10^{14} & 1,63 \times 10^{14} & 1,63 \times 10^{14} & 2,478 \times 10^5 \end{bmatrix} \quad (4-58)$$

Posteriormente, desenvolvendo a Equação (4-56) para os dados do modelo estudado encontrou-se os resultados apresentados na Tabela 4-2.

Plotou-se também as funções do primeiro modo de vibração da pá e da torre nas direções fora-do-plano e também no-plano (Figura 4-13, Figura 4-14, Figura 4-15 e Figura 4-16).

Tabela 4-2: Comparação do modelo pela frequência natural.

	Pá (no-plano) (Hz)	Pá (fora-do-plano) (Hz)	Torre (no-plano) (Hz)	Torre (fora-do-plano) (Hz)
Modelo	1,114	0,641	0,301	0,303
Literatura (ZUO <i>et al.</i>, 2018)	1,083	0,683	0,312	0,316
Diferença (%)	2,93	6,14	3,51	4,11

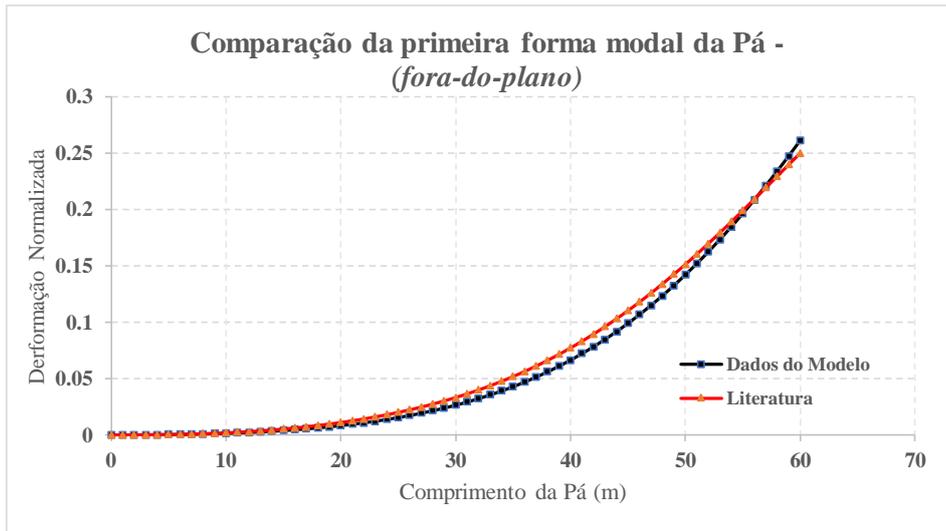


Figura 4-13 – Comparação da primeira forma modal da pá (fora-do-plano)

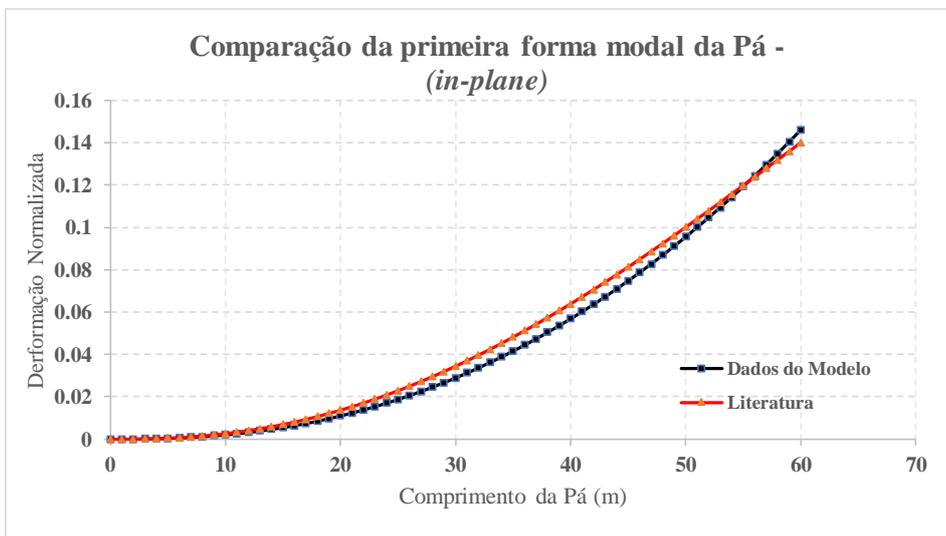


Figura 4-14 – Comparação da primeira forma modal da pá (no-plano)

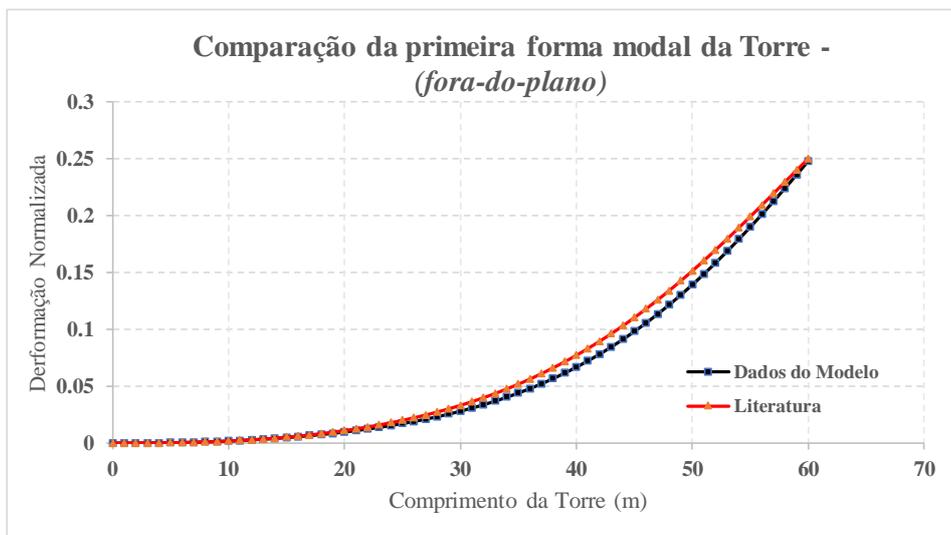


Figura 4-15 – Comparação da primeira forma modal da torre (fora-do-plano)

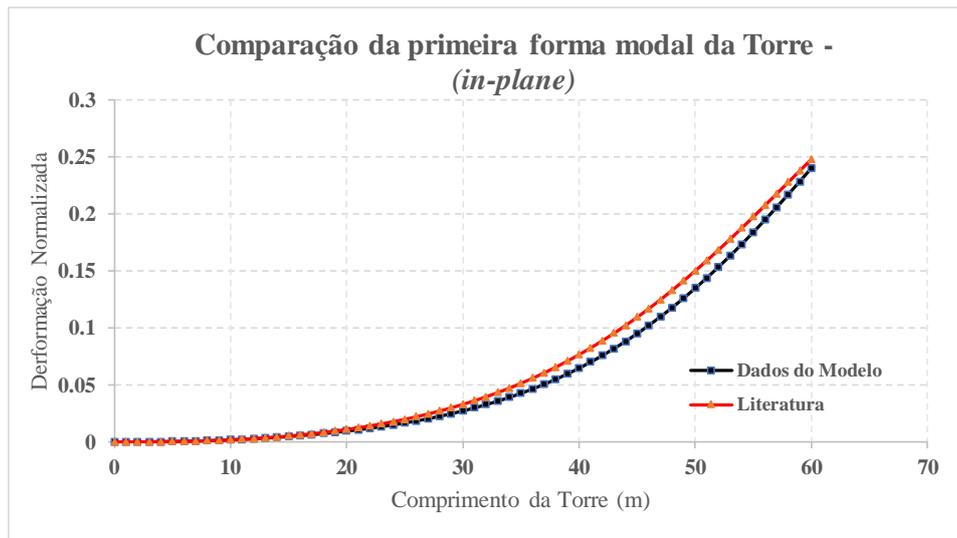


Figura 4-16 – Comparação da primeira forma modal da torre (no-plano)

Analisando os resultados da Tabela 4-2, percebe-se que há uma boa concordância entre esses obtidos e os encontrados no trabalho de ZUO *et al.*, 2018, no qual também há comparações com a literatura. Do mesmo modo que os resultados das frequências naturais, as formas do primeiro modo de vibração mostrados nas Figuras 4-13, 4-14, 4-15 e 4-16 confirmam que há uma boa concordância entre os resultados obtidos com o modelo utilizado nesta dissertação e os dados da NREL 5MW. Portanto, o modelo desenvolvido neste trabalho pode ser considerado adequado para analisar outras situações mostradas na sequência.

5 INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA (ISE)

Esta seção se destina a explicar um pouco sobre a ISE e como ela foi implementada neste trabalho. Uma vez que a decisão de se estudar a ISE no modelo de aerogerador foi tomada, um nível básico de compreensão do fenômeno físico e uma metodologia de análise prática para examinar seus efeitos são necessários.

É sabido que a resposta de uma estrutura devido a uma excitação externa é afetada pelas interações entre três sistemas interligados: a estrutura, a fundação e o solo subjacente e ao redor da fundação (NEHRP, 2012). A análise da interação solo-estrutura avalia a resposta coletiva desses sistemas a um movimento específico do solo. Entretanto, sabe-se também que não é sempre que a diferença entre se considerar ou não a ISE gera resultados significativamente divergentes em termos práticos. Deste modo, nesta dissertação busca-se saber o grau de influência da consideração da ISE e alguns importantes detalhes envolvidos neste processo no modelo do aerogerador considerado.

Segundo NEHRP (2012), os efeitos de ISE podem ser categorizados como efeitos de interação inercial, efeitos de interação cinemática e efeitos de flexibilidade do solo-fundação. Os termos interação cinemática e inercial foram introduzidos em 1975 por Robert Whitman (KAUSEL, 1975). A interação cinemática e interação inercial formam juntas a interação dinâmica solo-estrutura (WHITMAN E BIELAK, 1980).

O efeito da interação dinâmica da estrutura com o solo depende das propriedades de rigidez e de massa da estrutura, da rigidez do solo e das características de amortecimento de ambos. Esse processo apresenta, em geral, os seguintes efeitos básicos (WOLF, 1988):

- Diminuição dos efeitos de ressonância entre a estrutura e o solo;
- Dissipação parcial da energia de vibração da estrutura através da radiação no solo;
- Modificação do movimento do solo de fundação produto do movimento do solo livre;
- Filtragem das altas frequências da excitação.

1. Interação cinemática solo-estrutura

A interação cinemática pode ser explicada analisando as Figuras 5-1(a) e (b). Pela figura, percebe-se que a dimensão relativa da fundação em relação ao comprimento de onda é um

parâmetro chave. Altas frequências, como da Figura 5-b por exemplo, podem ser filtradas dependendo da rigidez da fundação.

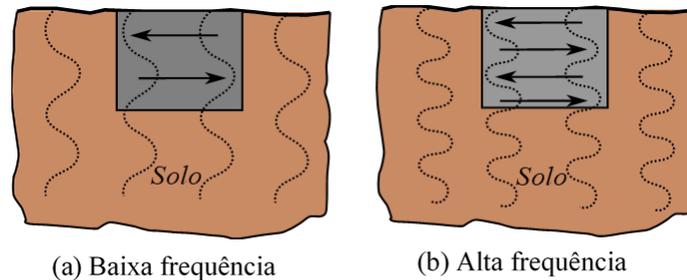


Figura 5-1 - Modelo da interação cinemática solo-estrutura Fonte Wolf, 1988 (adaptado).

Como consequência do contato da fundação com o solo, o movimento desse nas imediações e na própria fundação é alterada, fazendo a fundação apresentar oscilações diferentes para cada comportamento do solo. Essa interação da fundação com o movimento do solo é chamada de interação cinemática (WOLF, 1988).

2. Interação inercial

Essa interação é causada principalmente pelas forças inerciais geradas pelo movimento da estrutura devido ao deslocamento do solo durante um sismo ou outro tipo de movimentação. A inércia desenvolvida na estrutura, devido à sua própria vibração, dá origem a uma força cortante (C) e a um momento (M) na base, que por sua vez provocam deslocamentos (x_f) e um giro (θ_f) na fundação em relação ao campo livre (solo) como se observa na Figura 5-2. Esta interação é considerada o efeito mais importante no contato entre o solo e a estrutura já que afeta diretamente a flexibilidade do sistema e as propriedades dinâmicas da estrutura, tais como períodos e modos de vibração, além de introduzir amortecimento na fundação.

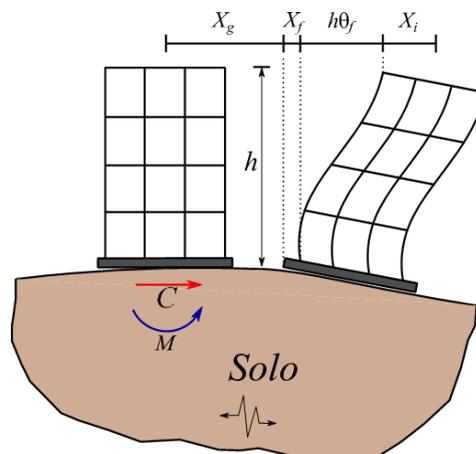


Figura 5-2 - Modelo da interação inercial.

O solo adjacente à fundação sofre a vibração produzida pelas forças de inércia. Essa energia se movimenta no solo sob a forma de ondas, as quais vão se dissipando assim que se introduzem no solo. Essa perda de energia é chamada de amortecimento por radiação do solo e é uma das características mais importantes dos efeitos inerciais. O amortecimento e rigidez associados ao solo podem ser obtidos usando as chamadas funções de impedância dependentes da frequência, as quais descrevem a flexibilidade do suporte da base.

Em resumo, o movimento da fundação e os movimentos de campo livre podem diferir devido a:

- Interação cinemática, na qual os elementos rígidos (fundação) colocados na superfície ou abaixo da superfície do solo fazem com que seus movimentos se desviem dos movimentos de campo livre devido ao comportamento de placa rígida da fundação, dispersão de onda e efeitos de embutimento na ausência de inércia tanto da estrutura quanto da fundação; e
- Deslocamentos relativos e rotações entre a fundação e o campo livre associado à inércia da estrutura e da fundação.

O fato do solo circundante ser mais flexível, altera a resposta do sistema. O *solo + estrutura* formam um novo sistema com novas características dinâmicas. Todos estes efeitos de interação entre o solo e a estrutura modificam, em alguns casos substancialmente, as respostas do sistema. Isso é conhecido como interação solo-estrutura. Segundo Wolf (1988), para a maioria das fundações a interação cinemática é pequena podendo ser desprezada nos cálculos numéricos. Como resultado, a interação solo-estrutura torna-se um problema de interação inercial.

Existem vários métodos para resolver esse tipo de problemas, sendo o Método Direto, o Método da Subestrutura e o Método das Molas e Amortecedores Equivalentes os mais utilizados (WOLF, 1988).

Método das Molas e Amortecedores Equivalentes

O método escolhido para o estudo da interação solo-estrutura nesta dissertação foi o Método das Molas e Amortecedores Equivalentes. Este método realiza uma análise no domínio do tempo simulando o solo por meio de um modelo discreto de molas e amortecedores, cujos

coeficientes são chamados de impedância e representam a rigidez e a capacidade de dissipação de energia do solo respectivamente, representando um semi-espaço homogêneo, isotrópico, elástico linear (BHATTACHARYA *et al.*, 2005).

Segundo Wolf (1988), ao trabalhar com fundações superficiais ou sapatas, tornam-se importantes os efeitos inercias, sendo os efeitos cinemáticos desprezíveis. Nesta dissertação, a sapata foi o tipo de fundação adotada para constituir o modelo do aerogerador. De tal modo, apresenta-se nesta seção a formulação matemática para o sistema simplificado.

1. Sistema simplificado

Considera-se um sistema bidimensional de um grau de liberdade como o mostrado na Figura 5-3, assentado através de uma base rígida sobre um semi-espaço homogêneo, isotrópico, elástico linear. Nessa figura, m_l e m_f representam os valores de massa da estrutura e da fundação, respectivamente. Já os valores de I_l e I_f indicam os momentos de inércia de massa da estrutura e da fundação.

O movimento do solo devido à excitação sísmica introduz dois movimentos na estrutura: deslocamento horizontal (x_f) e de balanço ou giro (θ_f) como se observa na Figura 5-3. Um modelo discreto de massa, amortecedor linear e rigidez foi adotado para representar os mecanismos do solo e da interação.

A rigidez do solo é representada por meio de molas com coeficientes k_h e k_θ e o efeito da dissipação de energia da excitação por amortecedores viscosos com coeficientes c_h e c_θ . Nesses coeficientes, os subscritos h e θ representam a componente horizontal e de giro, respectivamente. Na Figura 5-3 observa-se também que a estrutura foi representada como um modelo discreto de massa concentrada, amortecedor viscoso e uma mola linear. Percebe-se também que para o modelo desta dissertação, a torre não é flexível, ela apenas rotaciona e seu topo desloca em 'x'. Assim, esse deslocamento de topo é acrescido na nacelle e conseqüentemente em todo rotor e modelo 2 pode ser estudado como o modelo 1 acrescido do deslocamento devido a flexibilidade do solo.

Como foi dito antes, o sismo introduz dois movimentos na estrutura e essas grandezas adicionais fazem com que, além da equação de equilíbrio da estrutura, duas equações

adicionais devam ser satisfeitas. A equação do movimento do sistema da Figura 5-3, levando em consideração as grandezas adicionais, é dada por:

$$[M_{se}]\ddot{x}_{se}(t) + [C_{se}]\dot{x}_{se}(t) + [K]x_{se}(t) = -v_{se}\ddot{x}_g(t) \quad (5-1)$$

Em que:

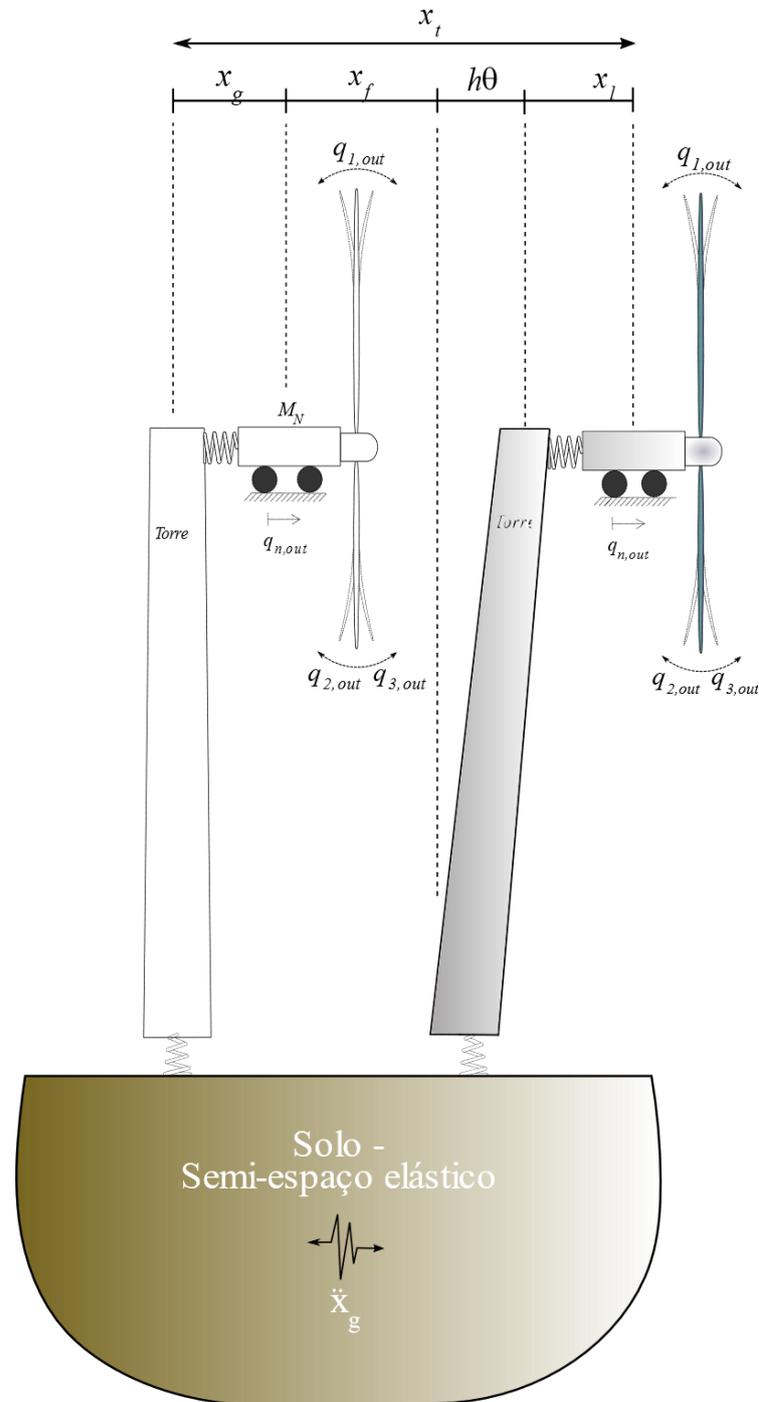


Figura 5-3 - Modelo do aerogerador – sistema simplificado do efeito sísmico.

- O subscrito *se* indica solo-estrutura;
- \mathbf{M}_{se} , \mathbf{C}_{se} e \mathbf{K}_{se} são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez do sistema estrutura – solo;
- \mathbf{v}_{se} é o vetor que define os graus de liberdade a serem excitados;
- $\ddot{\mathbf{x}}_g(t)$ corresponde à aceleração do solo;
- $\mathbf{x}_{se}(t)$ é o vetor que contém o deslocamento horizontal da estrutura relativo à fundação (x_I), o deslocamento da fundação (x_f) e o valor do giro da fundação (θ_f).

Os dois graus de liberdade adicionados pela interação solo-estrutura são dependentes do amortecimento, da rigidez e da massa do solo adotado. Três solos foram considerados neste estudo para verificar a influência da ISE; suas características estão descritas na Tabela 5-1. Este solos foram escolhidos para ser estudados com critérios baseados nos trabalhos de Harte *et al.* (2012) e Lombardi *et al.* (2013), nos quais eles escolhem solos para abranger três tipos de categorias: solos duros, médios e moles.

Tabela 5-1: Lista de solos analisados e suas propriedades físicas.

Solo	Es [Mpa]	ρ [Mpa]	ν
Solo 1 (mole)	15	16	0,4
Solo 2 (médio)	35	16	0,4
Solo 3 (duro)	65	18	0,4

Os dois graus de liberdade introduzidos pela ISE possuem obviamente coeficiente de amortecimento e rigidez. Os coeficientes k_h , k_θ , c_h e c_θ são chamados de coeficientes de impedância, cujos valores dependem do tipo de fundação e das propriedades mecânicas do solo tais como módulo de cisalhamento (G), velocidade média V_s de propagação de onda S e coeficiente de Poisson (ν) do solo, respectivamente.

Gazetas (1992) fornece uma série de fórmulas simples para o cálculo destes coeficientes, as quais cobrem quase todas as formas geométricas da fundação para diferentes profundidades de embutimento da sapata. Neste trabalho foram utilizadas sapatas circulares de raio igual a 10 m que são comuns para esse tipo de turbina (KHOSRAVIKIA *et al.* 2018). As funções de impedância para este tipo de fundação estão descritas nas Equações (5-2), (5-3), (5-4) e (5-5).

$$k_h = \frac{8 \cdot G \cdot r}{(2 - \nu)} \quad (5-2)$$

$$k_\theta = \frac{8 \cdot G \cdot r^3}{3(1 - \nu)} \quad (5-3)$$

$$c_h = \frac{4,6}{(2 - \nu)} \rho \cdot V_s \cdot r^2 \quad (5-4)$$

$$c_\theta = \frac{0,4}{(1 - \nu)} \rho \cdot V_s \cdot r^4 \quad (5-5)$$

Nas Equações anteriores, G , V_s , ρ , r representam o módulo cisalhante do solo, a velocidade de onda do solo nos 30 m superiores de depósito, a massa específica do solo e o raio das sapatas, respectivamente. O módulo de cisalhante do solo e a velocidade de onda podem ser calculadas utilizando as Equações (5-6) e (5-7), onde E_s representa o módulo de elasticidade do solo.

$$G = \frac{E_s}{2(1 + \nu)} \quad (5-6)$$

$$V_s = \left(\frac{G}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5-7)$$

Aplicando os dados dos solos adotados descritos na Tabela 5-1 nas Equações (5-6) e (5-7) obteve-se os valores de G e V_s descritos na Tabela 5-2.

Tabela 5-2: Módulo cisalhante e velocidade de onda dos solos.

Solo	G [Mpa]	V_s [m/s]
Solo 1 (mole)	5,35	57,3
Solo 2 (médio)	12,5	87,54
Solo 3 (duro)	23,21	112,5

Encontrado os valores do módulo cisalhante do solo, e da velocidade de onda foi possível se aplicar as Eqs. (5-2), (5-3), (5-4) e (5-5) e se obter os coeficientes das funções de impedância descritos na Tabela 5-3.

Tabela 5-3: Coeficientes de impedância para os diferentes tipos de solo.

Solo	k_h [N/m]	k_θ [N/m]	c_h [N/m]	c_θ [N/m]
Solo 1 (mole)	$2,68 \cdot 10^8$	$2,38 \cdot 10^{10}$	$2,63 \cdot 10^8$	$6,11 \cdot 10^9$
Solo 2 (médio)	$6,25 \cdot 10^8$	$5,56 \cdot 10^{10}$	$4,03 \cdot 10^8$	$9,34 \cdot 10^9$
Solo 3 (duro)	$11,61 \cdot 10^8$	$10,32 \cdot 10^{10}$	$5,82 \cdot 10^8$	$13,5 \cdot 10^9$

6 CARREGAMENTOS

Esta seção visa descrever o processo de obtenção e aplicação das cargas utilizadas nos modelos presentes nesta dissertação. Analisando a Eq. (4-8), pode-se perceber que toda a parte esquerda da equação corresponde a energia mínima do sistema e esta é igualada a força externa Q_i atuando no modelo. Para este estudo duas cargas externas são consideradas, uma carga de vento e uma carga sísmica e estas serão descritas a seguir.

6.1 Carregamento do vento

As respostas no tempo da força de arrasto do vento são simuladas de acordo com a teoria clássica do Momento do Elemento da Pá (BEM), que conjuga a teoria do momento com eventos locais que ocorrem nas pás reais (LOMBARDI *et al.*, 2013).

Com o método BEM, é possível calcular as cargas constantes do vento e, portanto, o empuxo e potência em relação à velocidade do vento, velocidade de rotação, e geometria da pá (em termos de perfil da pá, torção e distribuição ao longo do comprimento da pá). As cargas de vento são calculadas seguindo uma abordagem dada por Hansen (2003), que assume que todas as seções são independentes ao longo do rotor, de modo que a pá possa ser dividida em vários elementos e o fluxo do vento em cada elemento calculado separadamente.

Devido às mudanças na velocidade média do vento com a altura, à medida que a pá gira o componente de velocidade média nas pás experimenta uma variação senoidal em magnitude, a frequência dessa senoide é igual à velocidade de rotação do rotor. Portanto, a velocidade instantânea do vento pode ser expressa como na Eq. (6-1).

$$V_i = \bar{v}(H) + \Delta v \left(\frac{x}{L} \right) \cos(\Omega \cdot t + \theta_i) \quad (6-1)$$

Em que:

- H : é a altura da nacelle;
- $\bar{v}(H)$: é a velocidade média do vento na altura do hub;
- x : é a posição ao longo da pá; e
- Δv : é a mudança na velocidade do vento entre o hub e o topo da pá na posição vertical.

O fator de escala (x/L) é usado para calcular a amplitude necessária em cada ponto ao longo da pá, a fim de representar a velocidade do vento variando senoidalmente acima e abaixo do hub. O termo t é o tempo e θ_i é a diferença de fase entre as pás das turbinas. A velocidade relativa do vento, em relação a cada elemento da pá para cada pá, $V_{r,i}(r,t)$, é dada pela Eq. (6-2).

$$V_{r,i}(r,t) = \sqrt{[V_i(t) \cdot (1-a) + v^w(t)]^2 + [\Omega \cdot r \cdot (1+a')]^2} \quad (6-2)$$

Em que a e a' são os fatores de indução axiais e tangenciais que são calculados por meio do método BEM clássico com correções. A velocidade instantânea do vento aparente na pá, $V_i(t) \cdot (1-a)$, incorpora a velocidade média do vento que varia de forma senoidal devido à variação do vento com a altura e da rotação da pá. A turbulência é incluída apenas na direção normal.

A carga de vento em qualquer membro estrutural pode ser decomposta em uma velocidade média quase estática do vento V_i , e um componente turbulento flutuante $v^w(t)$. A geração deste componente turbulento flutuante $v^w(t)$ fora do plano de rotação é a base da simulação aerodinâmica e pode ser obtida através do uso de uma função de densidade espectral de potência. Perfis de velocidade de flutuação nodais variando com o tempo podem ser simuladas em virtude do fato de que um perfil de velocidade arbitrário, com média zero, pode ser uma versão discretizada de um conteúdo de frequência contínua como mostrado na Eq. (6-3).

$$v^w(t) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(\omega_k t) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \text{sen}(\omega_k t) \quad (6-3)$$

Em que:

- a_k e b_k : são os coeficientes de Fourier;
- ω_k : é a frequência circular discretizada; e
- t : é o instante de tempo.

O perfil velocidade flutuante variando com o tempo é gerado em conjunto com uma função de densidade espectral de potência de velocidade do vento. Os gráficos de deslocamento ao

longo do tempo foram simuladas usando a Eq. (6-4), uma versão modificada do espectro oferecido por Kaimal e descrito em Hansen (2003), expresso pela Eq. (6-4).

$$\frac{S_v(H, \omega)}{\sigma_v^2} = \frac{100c}{3\omega(1 + 50c)^{5/3}} \quad (6-4)$$

Em que:

- $S_v(H, \omega)$: é a função de densidade espectral de potência unilateral da velocidade do vento flutuante como uma função da altura do hub e da frequência circular (ω);
- σ_v^2 : é a variância (relacionada à intensidade da turbulência); e
- c : é conhecida como a coordenada Monin.

Este último termo pode ser obtido a partir das expressões,

$$c = \frac{\omega H}{2\pi \bar{v}(H)} \quad (6-5)$$

$$\bar{v}(H) = \frac{1}{k} v_* \cdot \ln \frac{H}{z_0} \quad (6-6)$$

Em que:

- k : é a constante de Von Karman (tipicamente em torno de 0,4);
- z_0 : é o comprimento da rugosidade; e
- v_* : é a velocidade de cisalhamento (*wind shear*).

A formulação acima foi usada para gerar uma turbulência homogênea e isotrópica na altura do hub para representar a turbulência através da área do rotor. Devido à rotação das pás, os espectros de turbulência são não homogêneos em sua natureza. No entanto, o foco deste trabalho não é este, portanto, o campo simplificado de turbulência é adequado. A carga de vento é tomada apenas na direção fora-do-plano. A força normal por unidade de comprimento da pá descrita por Satari e Hussain (2008), pode ser expressa pela Eq. (6-7).

$$p_{N,i} = \frac{1}{2} \rho V_{r,i}^2(r, t) C_N(\infty) \cdot x \quad (6-7)$$

Em que:

- ρ_{ar} : é a densidade do ar;
- x : é o comprimento do raio;
- $C_N(\infty)$: é o coeficiente normal que é dependente dos coeficientes de sustentação e arrasto (que são calculados a partir de tabelas baseadas nas propriedades do perfil da pá e do ângulo de ataque).

Integrando-se ao longo de todo o comprimento da pá do rotor R , a carga de vento generalizada na pá i pode ser fornecida pela Eq.(6-8).

$$F_i(t) = \int_0^R p_{N,i}(x,t) \cdot \phi_{out}(x) dx \quad (6-8)$$

Para o trabalho em questão, os seguintes coeficientes foram utilizados para se obter a carga de vento.

- $C_N(\infty) = 0,81$ - Baseado em Sun e Jahangiri (2018)
- $\rho = 1,3673 \text{ kg} / \text{m}^3$
- $c(r) = 0 - 61,5 \text{ m}$
- $\sigma_v^2 = 20\%$ - Baseado em Zhang *et al.* (2016)
- $v_* = 20 \text{ m} / \text{s}$ - Baseado em Fitzgerald & Basu (2016)
- $\omega = 12,1 \text{ rpm}$
- $k=0,4$

A partir dos dados adotados e os substituindo nas equações acima descrita pode-se encontrar a carga de vento utilizada neste trabalho.

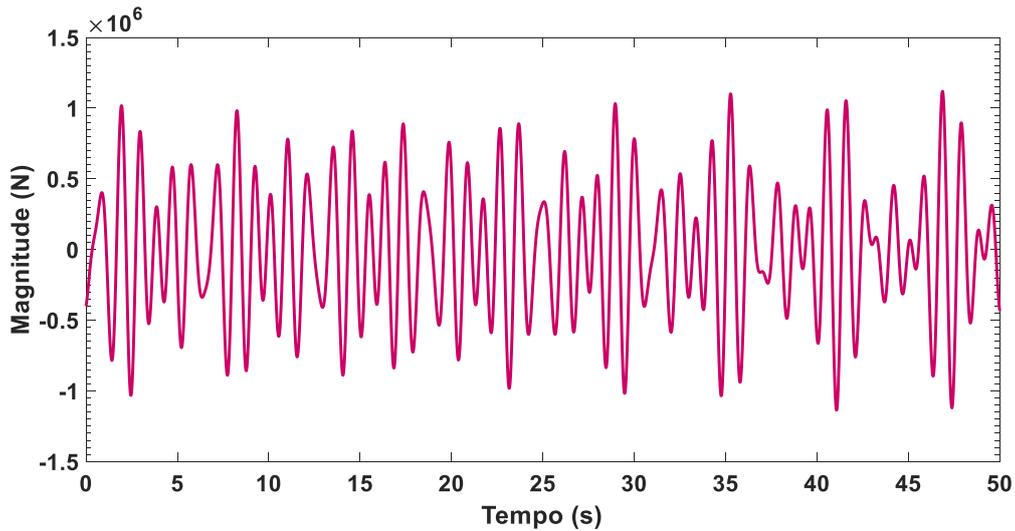


Figura 6-1: Carga de vento para direção fora-do-plano (velocidade média de 20 m/s).

6.2 Carregamento devido ao sismo – “El Centro”

Um modelo simplificado do problema de excitação sísmica é mostrado na Figura 6-2 em que o movimento horizontal do solo causado pelo terremoto é indicado pelo deslocamento $v_g(t)$ da base da estrutura em relação ao eixo de referência fixo. O exemplo mostrado na Figura 6-2 é de um pórtico, mas a mesma ideia pode ser utilizada na estrutura de aerogeradores.

Considera-se que a viga horizontal nesta estrutura é rígida e inclui toda a massa móvel da estrutura. Supõe-se que as colunas verticais sejam sem peso e inextensíveis na direção vertical (axial) e a resistência ao deslocamento da viga fornecida por cada coluna é representada por sua constante de mola $k/2$. A massa, portanto, possui um único grau de liberdade, $v(t)$, que está associado à deflexão da coluna; o amortecedor c fornece uma resistência do movimento proporcional à velocidade nesta coordenada.

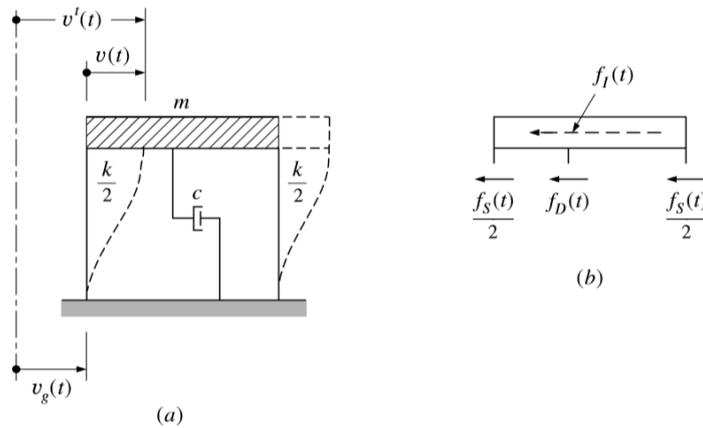


Figura 6-2 Sistema de um grau de liberdade com excitação na base. Fonte: (Clough, 2003)

A equação de movimento para um sistema de um grau de liberdade sob a ação sísmica, Figura 6-2, resulta na Eq. (6-9).

$$F_i(t) + F_d(t) + F_s(t) = 0 \quad (6-9)$$

Cada uma das forças pode ser detalhada como segue:

- $F_i(t) = m\ddot{v}^i(t) \rightarrow$ Forças Inerciais
- $F_d(t) = c\dot{v}^i(t) \rightarrow$ Forças de amortecimento
- $F_s(t) = kv(t) \rightarrow$ Forças elásticas

Em que:

- m : massa;
- c : constante de amortecimento; e
- k : rigidez do sistema.

Em um evento sísmico, além do movimento da estrutura, deve se considerar o movimento da base dado pela aceleração do solo. Desta forma, a aceleração na equação é igual a aceleração total (\ddot{v}^i), composta pela aceleração do solo (\ddot{v}_g) mais a aceleração provocada pela deformação da estrutura (\ddot{v}).

$$\ddot{v}^i = \ddot{v}(t) + \ddot{v}_g(t) \quad (6-10)$$

Substituindo a Eq. (6-10) na Eq. (6-9) se obtém então a equação (6-11).

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = -m\ddot{v}_g(t) \quad (6-11)$$

Esta equação representa o movimento de um sistema de um grau de liberdade submetido a excitação na base, que é o caso dos eventos sísmicos, onde o lado direito da equação corresponde às acelerações provocadas pelos eventos mencionados.

Também tem que se levar em conta que há três tipos de movimentos:

O primeiro correspondente ao movimento do solo:

- $\ddot{v}_g(t), \dot{v}_g(t), v_g(t)$

O segundo corresponde ao movimento total com respeito a um eixo de referência:

- $\ddot{v}^t(t), \dot{v}^t(t), v^t(t)$

O terceiro é o movimento relativo, que se dá pelas diferenças entre os outros dois movimentos (movimento devido à deformação da estrutura).

$$\ddot{v}(t) = \ddot{v}^t(t) - \ddot{v}_g(t) \quad (6-12)$$

$$\dot{v}(t) = \dot{v}^t(t) - \dot{v}_g(t) \quad (6-13)$$

$$v(t) = v^t(t) - v_g(t) \quad (6-14)$$

Expressando a força inercial em termos dos dois componentes de aceleração obtidos pela dupla diferenciação da Eq. (6-12) e substituindo o resultado Eq. (6-11) tem-se a Equação (6-15).

$$m\ddot{v}(t) + m\ddot{v}_g(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = 0 \quad (6-15)$$

Como a aceleração do solo representa a entrada dinâmica especificada para a estrutura, a mesma equação de movimento pode ser mais convenientemente escrita como a Eq. (6-16).

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = -m\ddot{v}_g(t) \equiv p_{\text{eff}}(t) \quad (6-16)$$

Nesta equação, $p_{\text{eff}}(t)$ denota a carga efetiva de excitação do suporte; em outras palavras, as deformações estruturais causadas pela aceleração do solo $\ddot{v}_g(t)$ são exatamente as mesmas

que seriam produzidas por uma carga externa $p(t)$ igual a $-m\ddot{v}_g(t)$. O sinal negativo nessa definição de carga efetiva indica que a força efetiva se opõe ao sentido da aceleração do solo. Na prática, isso tem pouco significado na medida em que o engenheiro geralmente está interessado apenas no valor absoluto máximo de $v(t)$. Nesse caso, o sinal de menos pode ser removido do termo de carregamento efetivo.

Este mesmo método de solução foi expandido para os modelos estudados neste trabalho. As acelerações do solo ($\ddot{v}_g(t)$) foram obtidas através dos dados do sismo ‘El Centro’ ocorrido na Califórnia em 1940.

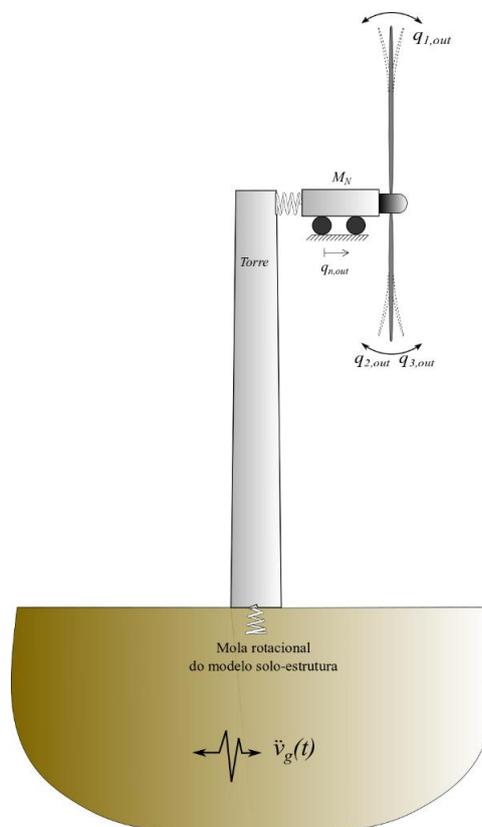


Figura 6-3: Sismo inserido no modelo.

7 RESULTADOS

Esta seção visa apresentar os resultados obtidos para as três condições que este trabalho se propôs a examinar. Todas as análises aqui apresentadas foram obtidas utilizando o carregamento conjunto do vento e do sismo.

7.1 Influência da condição operacional

Para estudar a influência das condições operacionais da turbina eólica nas respostas estruturais, dois casos são investigados nesta seção. No primeiro caso, a turbina eólica está na condição estacionada, com a posição das pás exatamente igual às mostradas na Figura 7-1. No segundo caso, as pás estão girando com uma velocidade angular uniforme de 12,1 rpm, o que corresponde à velocidade nominal do rotor da turbina eólica NREL 5MW. As cargas de vento e terremoto discutidas na seção 6 são aplicadas ao aerogerador em ambas condições. Uma duração de 50s é considerada para todas as fontes externas de vibração. A fim de simplificar o problema, a ISE não é considerada nesta seção, ou seja, a turbina eólica é fixada no nível do solo. Na Figura 7-1 são mostrados os deslocamentos para as duas condições analisadas. Estes resultados se referem ao deslocamento da torre para as duas direções consideradas neste trabalho, direção fora-do-plano e no-plano.

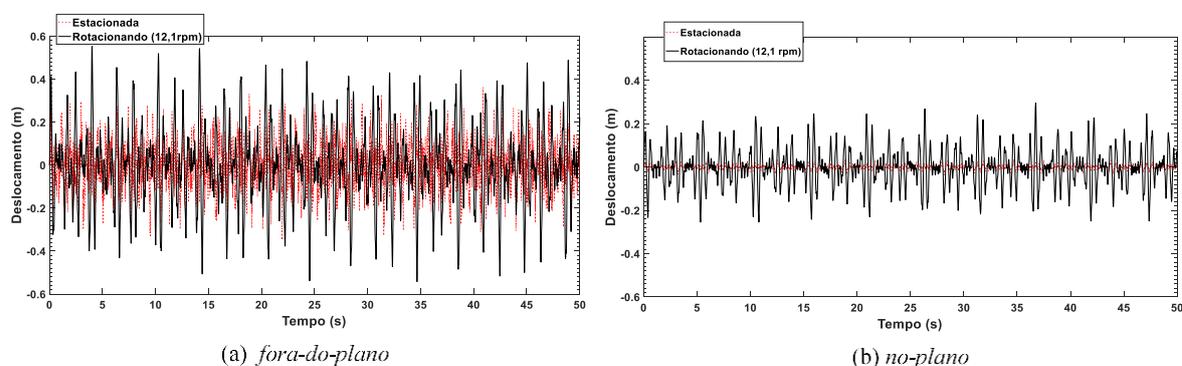


Figura 7-1: Deslocamento do topo torre pelo tempo.

É certo que as respostas ao longo da torre são diferentes e as respostas máximas ocorrem no topo da torre. Por concisão, apenas as respostas máximas são discutidas no presente estudo, tanto para as pás quanto para a torre.

Na Figura 7-1, as linhas vermelhas representam os resultados quando as pás estão na condição estacionada e as linhas pretas são os deslocamentos quando elas estão girando. Desta maneira, pode-se perceber que os deslocamentos na condição de operação são maiores

do que aqueles na condição estacionada em ambas as direções. Pode ser visto também na Figura 7-1, que o deslocamento máximo para os movimentos fora-do-plano no topo da torre é de **0,571 m** ocorrendo em **t = 34,9 s** quando a turbina eólica está em operação. Quando as pás estão estacionadas, um deslocamento máximo de **0,365 m** ocorre em **t = 41,5 s**. A Figura 7-1b mostra os deslocamentos na direção no-plano, por ela pode-se ver que os valores máximos desses deslocamento são **0,053** e **0,296m**, quando a turbina eólica está nas condições estacionada e operando, respectivamente.

Esses resultados eram realmente esperados, uma vez que, quando as pás estão girando, as cargas de vento atuando nas pás são maiores em comparação com a condição estacionada. Cargas de vento maiores nas pás resultam em interação mais severa entre a torre e as pás e, portanto, maiores respostas da torre. Desta forma, estes dados indicam que estudos prévios, assumindo que turbinas eólicas na condição estacionada, podem resultar em estimativas de respostas estruturais não conservadoras, que, por sua vez, podem levar ao projeto inseguro de componentes estruturais.

Comparando as Figura 7-1a e Figura 7-1b é notado que os deslocamentos na direção ‘no-plano’ da torre são muito menores do que as respostas ‘fora-do-plano’ em ambos os casos. Duas razões levam a esses resultados. A primeira é que as cargas de vento e de terremoto são aplicadas somente na direção fora-do-plano da torre, e nenhuma fonte externa de vibração é acionada na direção ‘no-plano’. A outra razão é que as cargas de vento nas pás nas direções ‘fora-do-plano’ e ‘no-plano’ são quase as mesmas quando a turbina eólica está em a condição estacionada, enquanto que quando está na condição de operação, as cargas de vento no sentido fora do plano de rotação são muito maiores do que aquelas na direção do plano de rotação. As maiores cargas de vento nas pás resultam numa interação mais severa entre a torre e as pás e conduzem às maiores respostas da torre na direção fora do plano do rotor, como discutido acima. Adicionalmente, há ainda a carga devido ao sismo que também atua na direção fora-do-plano.

As Fig. 7-2 e 7-3 mostram os PSDs das respostas de aceleração no topo da torre nas direções fora do plano e no plano, respectivamente, quando as pás estão nas condições de operação e estacionadas. Como mostrado na Fig. 7-2, um pico evidente aparece em **0,34 Hz**. Como mostrado anteriormente este valor corresponde ao primeiro modo de vibração da torre na direção fora do plano, o que significa que o primeiro modo de vibração é excitado pelas

fontes externas de vibração. A Fig. 7-2 também mostra que outro pico ocorre a **0,591 Hz** e **0,583 Hz**, respectivamente, quando a turbina eólica está nas condições estacionária e operacional. Como mostrado na anteriormente, esse é o primeiro modo de vibração das pás quando a turbina eólica. Esses resultados indicam novamente que a interação entre a torre e as pás faz com que as vibrações das pás contribuam para as respostas da torre. Em comparação com a condição estacionada, a primeira frequência de vibração das pás é ligeiramente maior quando está na condição de operação, como mostrado na Fig. 7-2. Isso ocorre porque a rigidez centrífuga das pás é gerada quando a turbina eólica está operando, o que, por sua vez, leva a uma grande rigidez estrutural e frequência de vibração das pás.

Para os PSDs na direção no-plano, a Fig. 7-3 mostra que um pico aparece em **0,312 Hz**, e esse pico corresponde ao primeiro modo de vibração da torre na direção no-plano. Comparando os resultados na Fig. 7-3 com os da Fig. 7-2 é evidente que as energias são muito menores na direção no-plano, o que resulta nas menores respostas da torre em nesta direção, como mostrado na Fig. 7-1. Da mesma forma, em comparação com a curva preta, os valores na curva vermelha são maiores, e isso explica as respostas estruturais maiores na condição de operação, como mostrado na Figura 7-1.

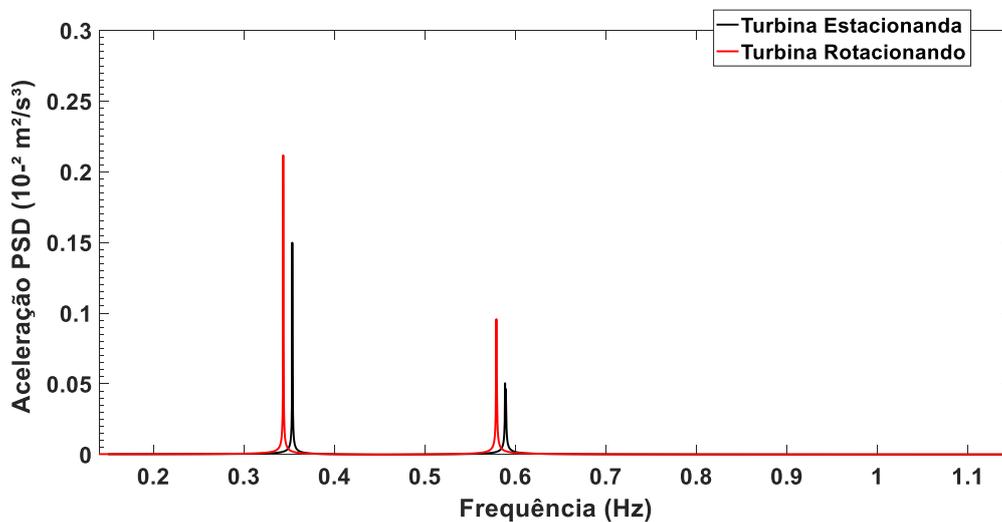


Figura 7-2: PSD da resposta de aceleração no topo da torre na direção fora-do-plano quando as pás estão nas condições de operação e estacionadas.

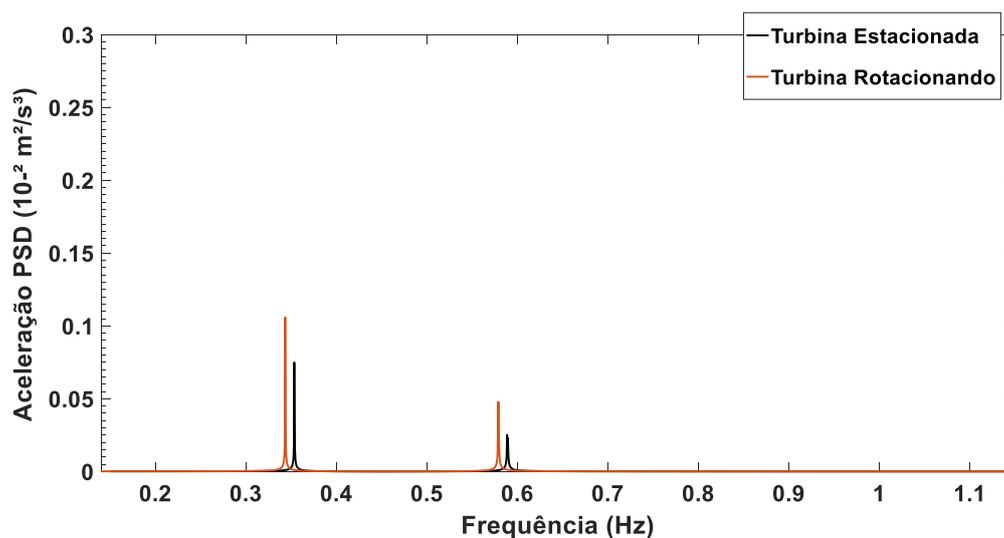


Figura 7-3: PSD da resposta de aceleração no topo da torre nas direção no-plano quando as pás estão nas condições de operação e estacionadas.

Sequencialmente, analisaram-se as mesmas condições operacionais e suas influências nas respostas das pás. A Figura 7-4 mostra o deslocamento pelo tempo nas pontas das pás no sentido fora-do-plano. Os deslocamentos no sentido fora-do-plano nas pontas das pás 1, 2 e 3 são **0,509 m**, **0,451 m** e **0,404 m** respectivamente quando a turbina eólica está na condição estacionada. Os deslocamentos nas pontas das pás são diferentes. Isso ocorre porque as localizações das pás, mostradas na Figura 7-4, não são as mesmas, o que gera diferentes influências do peso próprio, e mesmo que as excitações aplicadas sejam as mesmas as respostas estruturais são diferentes. O resultado também mostra que o deslocamento máximo na direção fora-do-plano na pá 3 é menor do que nas pás 1 e 2, isso porque o peso próprio na pá 1 gera maior tração do que aqueles nas Pás 2 e 3 e isso aumenta a rigidez da pá.

A Figura 7-4 também mostra que os deslocamentos máximos são muito maiores quando as pás estão girando sendo os valores correspondentes iguais a: **1,024 m**, **1,102 m** e **1,114 m** respectivamente. Esta pequena diferença entre deslocamentos das pás se deve ao fato de que quando a turbina eólica está na condição de operação, as vibrações das pás não são as mesmas e são influenciadas pelos locais de origem das pás quando se iniciou a rotação.

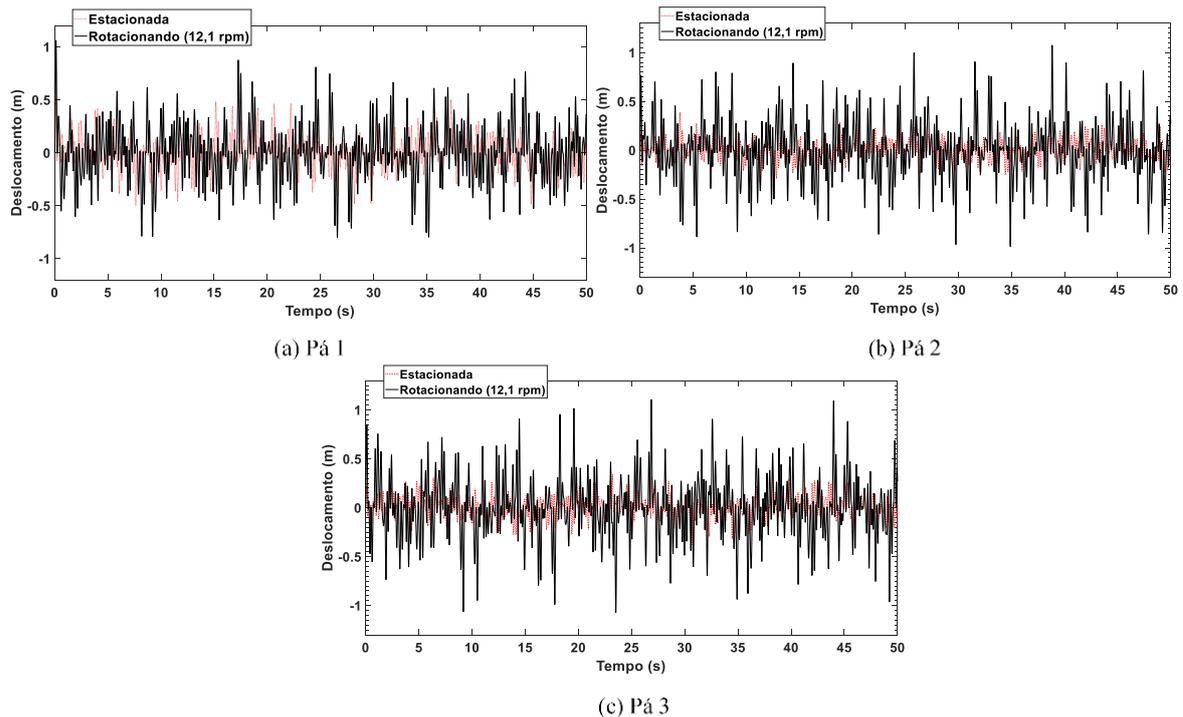


Figura 7-4: Deslocamento das pás na direção fora-do-plano.

A Figura 7-5 mostra os deslocamentos da ponta das pás quando estas estão nas condições estacionada e também em operação. Como mostrado na Figura 7-5, os deslocamentos máximos da borda lateral (deslocamento no-plano) nas pontas das Pás 1, 2 e 3 são **0,097 m**, **0,108 m** e **0,105 m**, respectivamente, quando a turbina está na condição estacionada. As respostas das três pás são muito parecidas devido ao fato de as três possuírem os mesmos parâmetros geométricos e estruturais no plano do rotor. Quando as pás estão girando, como mostrado na Figura 7-5, a resposta encontrada nas pontas das Pás 1, 2 e 3 são **0,341 m**, **0,325 m** e **0,345 m**, respectivamente. Comparado com a condição estacionada, os deslocamentos das pás são muito maiores quando estão girando, isso ocorre pelo mesmo motivo do que ocorre na torre, explicado previamente.

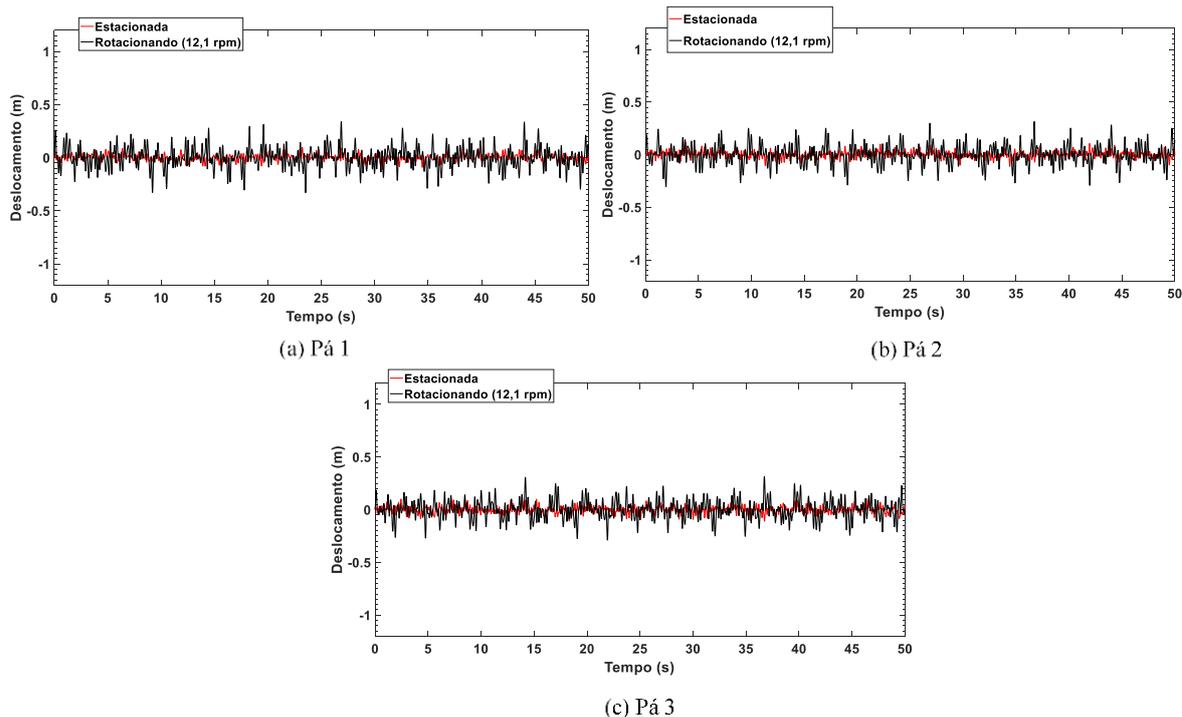


Figura 7-5: Deslocamento das pás no sentido do plano de rotação.

7.2 Influência da ISE

Para investigar o efeito da ISE sobre os comportamentos dinâmicos da turbina eólica, três solos diferentes resistência ao cisalhamento são considerados no presente estudo e são usados para representar os típicos solos moles, médios e rígidos (ver Seção 5). As mesmas fontes de excitação são utilizadas na análise anterior são aqui consideradas.

Como mostrado na Figura 7-6, a consideração da ISE pode diminuir significativamente as frequências de vibração da torre especialmente para a condição de solo mole. Isto ocorre porque a consideração da fundação ser cercada pelo solo e este sofrer deslocamentos torna a torre mais flexível, em comparação com o caso da turbina eólica totalmente fixada no solo e este não se deformar (se a ISE não é considerada). Como a rigidez da torre se torna menor, as frequências de vibração da torre, portanto, diminuem. Por exemplo, quando a fundação está embutida no solo mole, a primeira frequência de vibração da torre na direção fora-do-plano é de **0,28 Hz** e é de **0,33 Hz** quando a ISE não é considerada. A taxa de redução chega a 15,2%. Deve-se notar que a energia da carga de vento se concentra dentro da faixa de 0 a 0,25 Hz (Zuo, Bi e Hao, 2018a), quando a ISE é considerada, a primeira frequência de vibração da torre está mais próxima da frequência dominante da carga de vento. Nesse caso, a ressonância pode ocorrer e respostas estruturais maiores são esperadas. Portanto,

considerando os resultados aqui obtidos, indica-se a consideração da ISE para prever com mais precisão as respostas dinâmicas da turbina eólica.

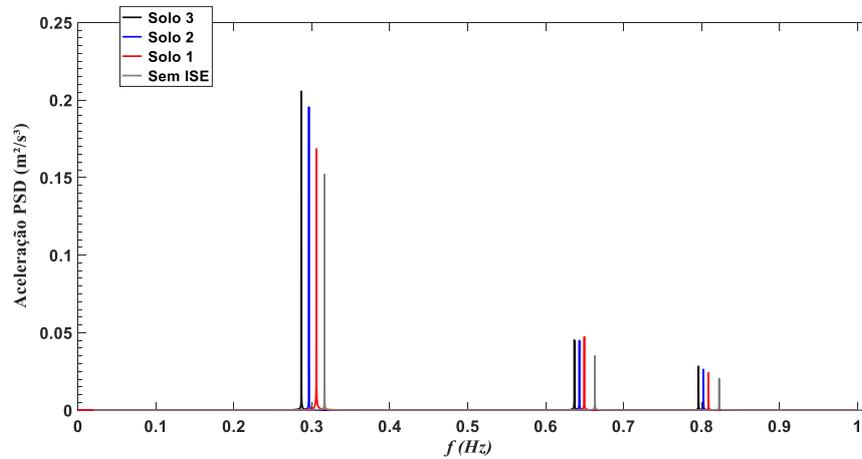


Figura 7-6: Frequências da torre para as diferentes condições de solo.

Diferentemente da análise modal, a turbina eólica é assumida na condição de operação quando as respostas estruturais são calculadas. Nesta seção, uma velocidade angular do rotor de 12,1 rpm é considerada. A Figura 7-6 mostra as densidades espectrais de potência das respostas de aceleração no topo da torre nas direções fora-do-plano sem e com o efeito de ISE. Como mostrado, a primeira frequência de vibração da torre na direção fora-do-plano se desloca para um valor menor quando a ISE é considerada, e eles são **0,28 Hz**, **0,293 Hz** e **0,313 Hz** quando a fundação está embutida no solo 1, solo 2 e solo 3 respectivamente. A Figura 7-6, também mostra que a maior energia é obtida para o solo mais mole, o que, por sua vez, resulta nas maiores respostas da torre, como mostrado na Figura 7-7.

A Figura 7-7 mostra o deslocamento ao longo do tempo no topo da torre na direção fora-do-plano sem e com a consideração da ISE. A Tabela 7-1 informa os deslocamentos máximo fora-do-plano no topo da torre, e as diferenças correspondentes entre os deslocamentos de pico sem e com ISE são dados na tabela também. Como mostrado na Figura 7-7, as amplitudes das vibrações da torre são muito maiores nas direções fora-do-plano quando a ISE é considerada, e com o incremento da resistência ao cisalhamento do solo, a rigidez lateral do solo aumenta e a diminui a deflexão na torre. Os deslocamentos fora-do-plano no topo da torre são **1,331 m**, **1,223 m** e **0,947 m** quando a fundação está embutida no solo 1, solo 2 e solo 3 respectivamente, que aumenta as respostas em **101,2%**, **85,2 %** e **43,5%**, em comparação com o valor quando a turbina eólica é fixada no solo (**0,66 m**), ou seja, negligenciando a interação entre a fundação e o solo circundante (Figura 7-7 e Tabela 7-1).

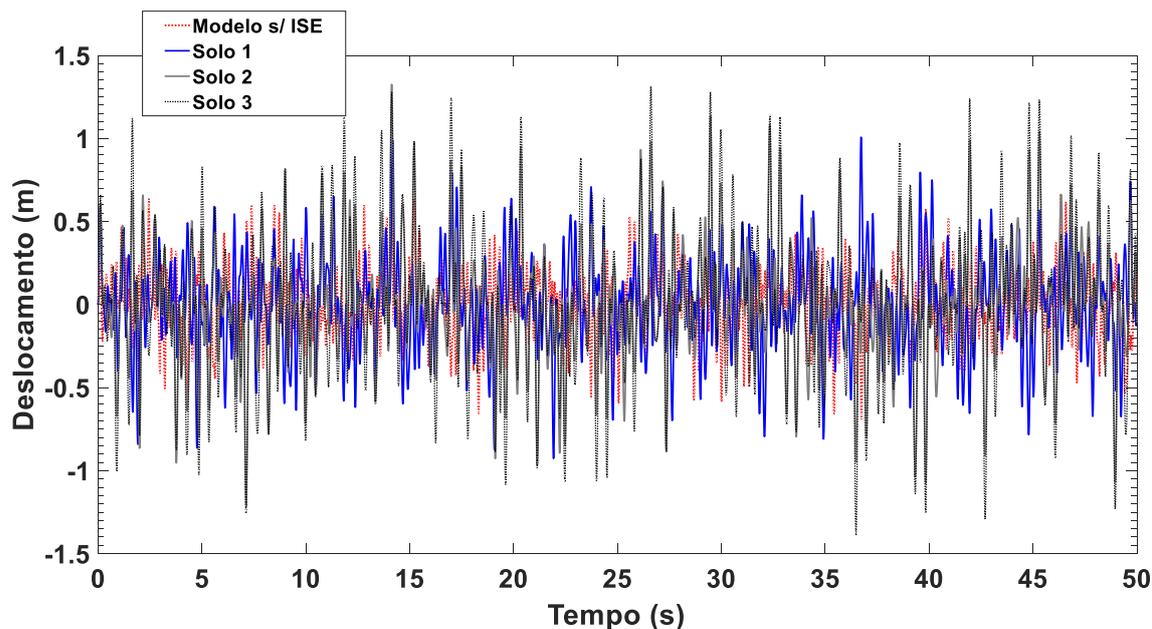


Figura 7-7: Deslocamento da torre na direção fora-do-plano para diferentes condições de solos.

Tabela 7-1: Deslocamento máximo da torre considerando a ISE.

	Sem ISE (m)	Solo 1		Solo 2		Solo 3	
		Deslocamento (m)	Diferença (%)	Deslocamento (m)	Diferença (%)	Deslocamento (m)	Diferença (%)
Torre	0,606	0,947	43,5 %	1,223	85,2 %	1,331	101,2 %

Para a análise do deslocamento das pás, por simplificação, apenas as respostas da pá 1 foram consideradas. A Figura 7-8 mostra os deslocamentos nas pontas da pá 1 ao longo do tempo no sentido fora-do-plano. A Tabela 7-2 mostra o deslocamento máximo em cada ponta da pá e as diferenças correspondentes quando o ISE é considerado ou não. Como mostrado nessa, os maiores deslocamentos na ponta da Pá 1 são **1,606 m**, **1,431 m** e **1,220 m** quando a fundação está embutida no solo 1, solo 2 e solo 3 respectivamente, o que aumenta as respostas em **59,0%**, **41,7 %** e **20,9%**, respetivamente, em comparação com o valor quando a turbina eólica é fixada no solo (**1,01 m**).

Pode-se observar que as respostas de deslocamento das pás são influenciadas pela ISE, mas os deslocamentos são menores que os da torre (Tabela 7-1). Isso ocorre porque as molas do solo estão diretamente conectadas à fundação da torre, enquanto a influência do ISE nas pás é principalmente através da interação (indireta) entre a torre e as pás. Como discutido acima, o solo mais mole leva a maiores vibrações frontais e laterais da torre, o que, por sua vez, leva à interação mais severa entre a torre e as pás e, portanto, os maiores deslocamentos das pás.

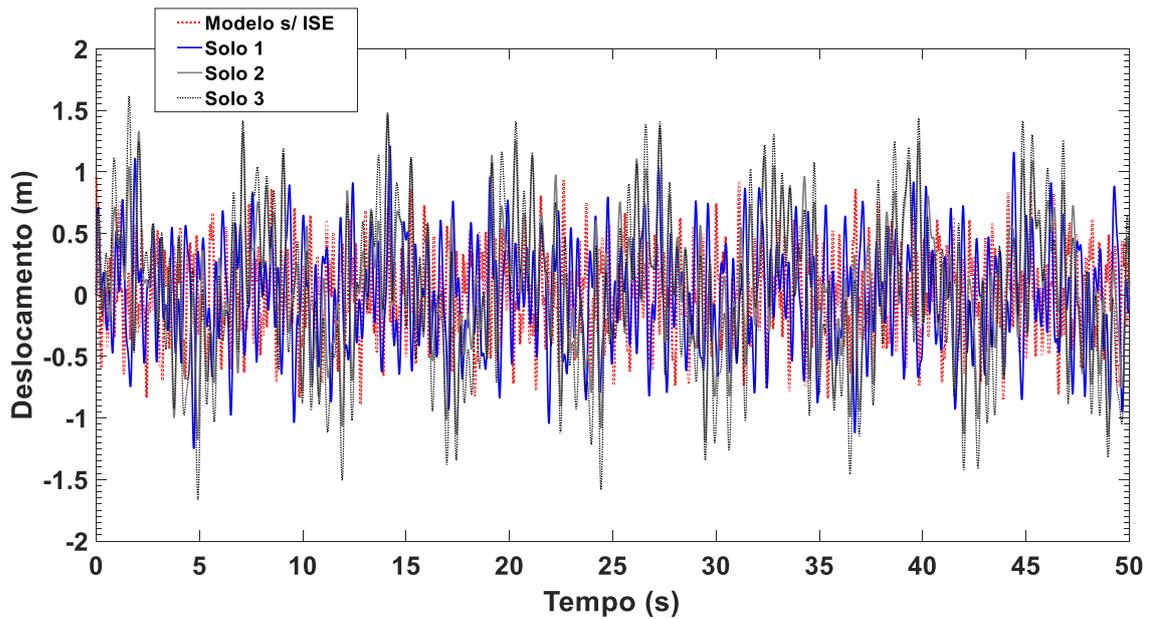


Figura 7-8: Deslocamento da pá 1 na direção fora-do-plano para diferentes condições de solos.

A Figura 7-9 mostra o deslocamento lateral na ponta da Pá 1 ao longo do tempo, e os deslocamentos nas outras duas pás não são mostrados por serem muito próximos. Como esperado, novamente os deslocamentos das bordas das pás rotativas são governados pela rotação do rotor, isso implica que a ISE tem um efeito insignificante nas respostas de deslocamento das pás na direção no-plano. Isso ocorre porque as vibrações da torre na direção lateral são muito pequenas, como mostrado na Figura 7-9, o que resulta em interações desprezíveis entre a torre e as pás neste sentido. Os resultados são consistentes com os relatados por Fitzgerald e Basu, (2016).

Tabela 7-2: Deslocamento máximo da Pá 1 nas duas direções de estudo considerando a ISE.

Pá 1	Sem ISE (m)	Solo 1 Deslocamento (m)	Diferença (%)	Solo 2 Deslocamento (m)	Diferença (%)	Solo 3 Deslocamento (m)	Diferença (%)
Fora-do-plano	1,01	1,220	20,9 %	1,431	41,7 %	1,606	59 %
No-plano	0,325	0,351	8,0 %	0,388	19,4 %	0,401	23,4 %

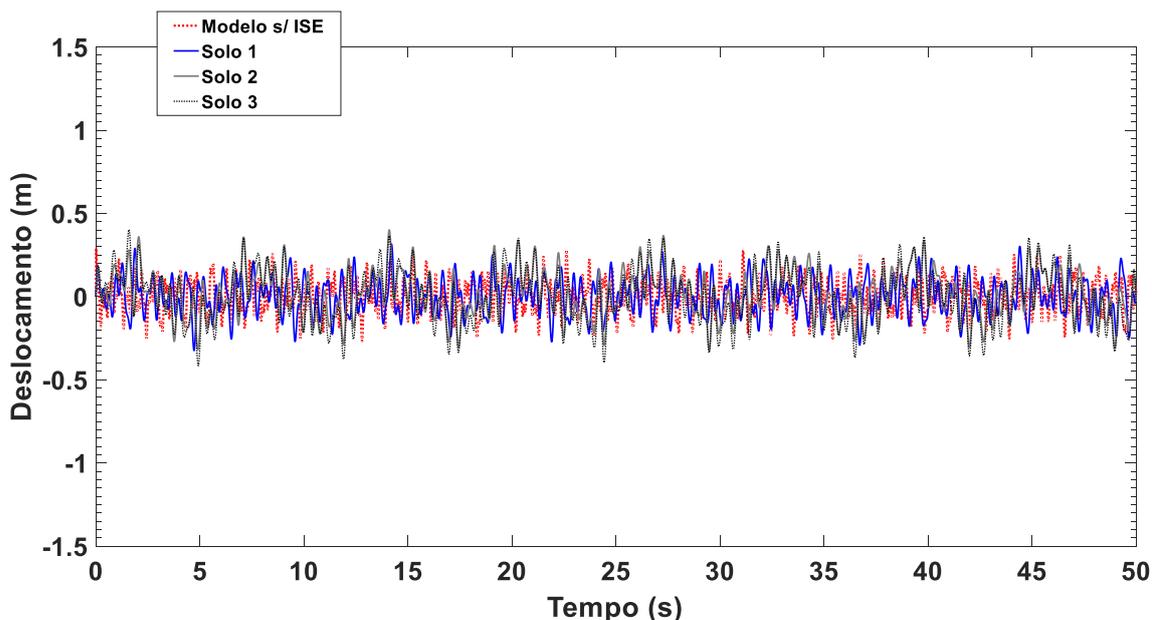


Figura 7-9: Deslocamento da Pá 1 na direção no-plano para diferentes condições de solos.

7.3 Influência da velocidade do rotor

A velocidade do rotor também pode influenciar significativamente as respostas estruturais (ZUO *et al.*, 2018). As velocidades de partida e nominal projetadas da turbina eólica NREL 5MW são de 6,9 e 12,1 rpm, respectivamente, conforme mostrado na Tabela 4-1. Em outras palavras, a turbina eólica começa a girar a uma velocidade de rotor de 6,9 rpm e a potência máxima de saída da turbina eólica será alcançada a uma velocidade de rotor (nominal) de 12,1 rpm. Para examinar a influência da velocidade do rotor, a velocidade do rotor de 6,3 rpm e 12,1 rpm são investigadas, que estão dentro da faixa de velocidade do rotor projetada. No presente estudo, outra velocidade do rotor de 20 rpm também é considerada como exemplo de uma condição de pior rotatividade. A ISE não é considerada nesta seção.

Conforme discutido na Seção 5, as cargas de vento nas pás são influenciadas pela velocidade do rotor. Desta forma, pode ser visto que a velocidade maior do rotor resulta em cargas de vento maiores atuando na pá. Através da Figura 7-10 e Figura 7-11, pode-se perceber as respostas do deslocamento ao longo do tempo, para o topo da torre, aumentado em ambas as direções com o incremento da velocidade do rotor. Os deslocamentos obtidos para a direção fora-do-plano foram **0,671 m**, **0,641 m** e **0,609 m** respectivamente quando $\Omega = 20,0$, 12,1 e 6,9 rpm, e os valores correspondentes na direção no-plano são **0,28 m**, **0,21 m** e **0,182 m**. Isso ocorre porque as cargas de vento que atuam nas pás são maiores com o incremento da

velocidade do rotor, conforme discutido acima, e cargas maiores resultam em respostas estruturais maiores.

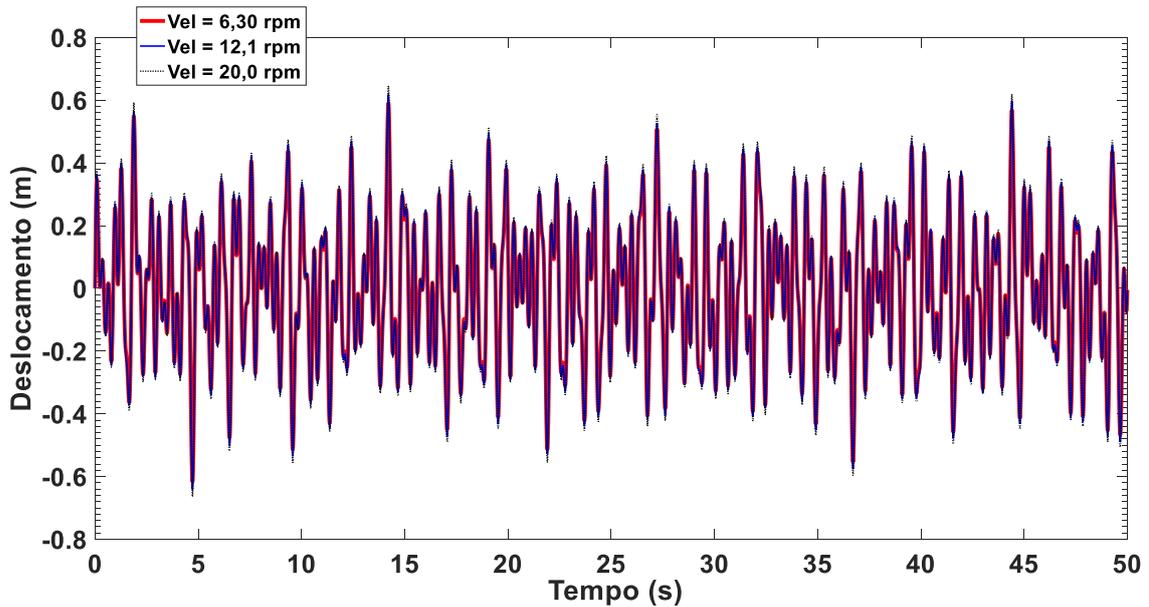


Figura 7-10: Deslocamentos da torre na direção fora-do-plano para três diferentes velocidades de rotação.

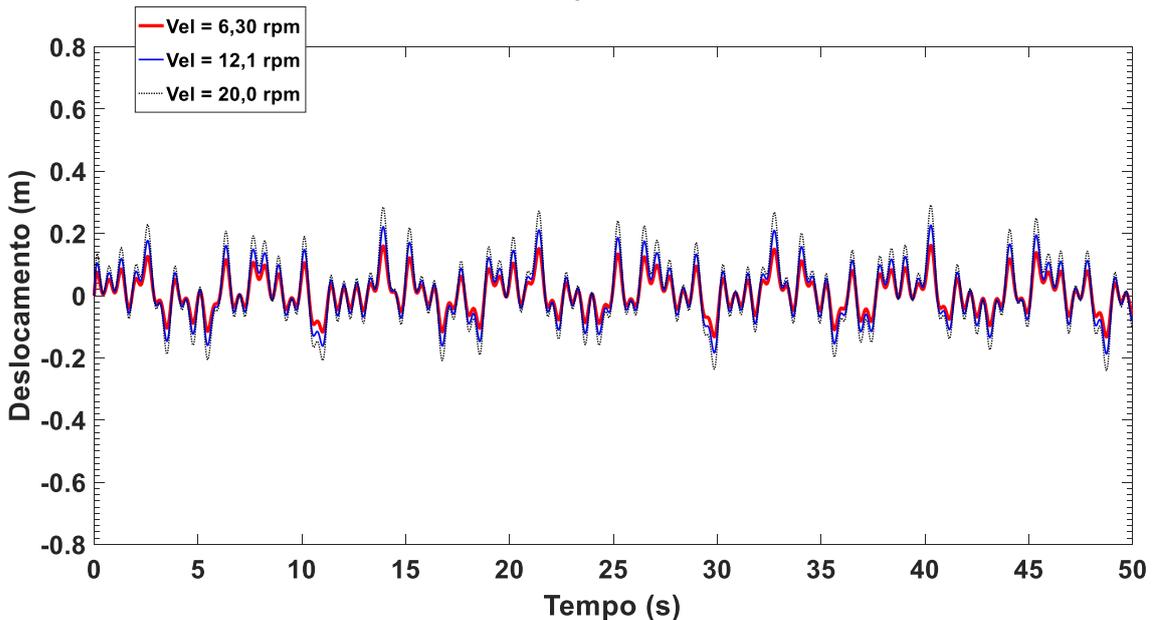


Figura 7-11: Deslocamentos da torre na direção no-plano para três diferentes velocidades de rotação.

A Figura 7-12 mostra o deslocamento na ponta da pá 1 no sentido do sentido fora-do-plano de rotação ao longo do tempo. Já a Figura 7-13 mostra os deslocamentos laterais da ponta da pá 1. Para concisão, as respostas para as outras duas pás não são plotadas na figura. Tendência semelhante as das análises anteriores é obtida.

Como pode ser percebido através das Figuras 7-10 e 7-11, tanto as respostas de deslocamento das pás fora-do-plano quanto as no-plano aumentam com o incremento da velocidade do

rotor. Isto porque, como discutido acima, as cargas de vento que atuam nas pás são diretamente proporcionais a velocidade de rotação delas; cargas maiores, por sua vez, certamente levam ao aumento do deslocamento. Os deslocamentos máximos na ponta da pá 1 no sentido do fora-do-plano são **1,026 m**, **1,124 m** e **1,355m** respectivamente quando $\Omega = 6,9$, $12,1$ e 20 rpm.

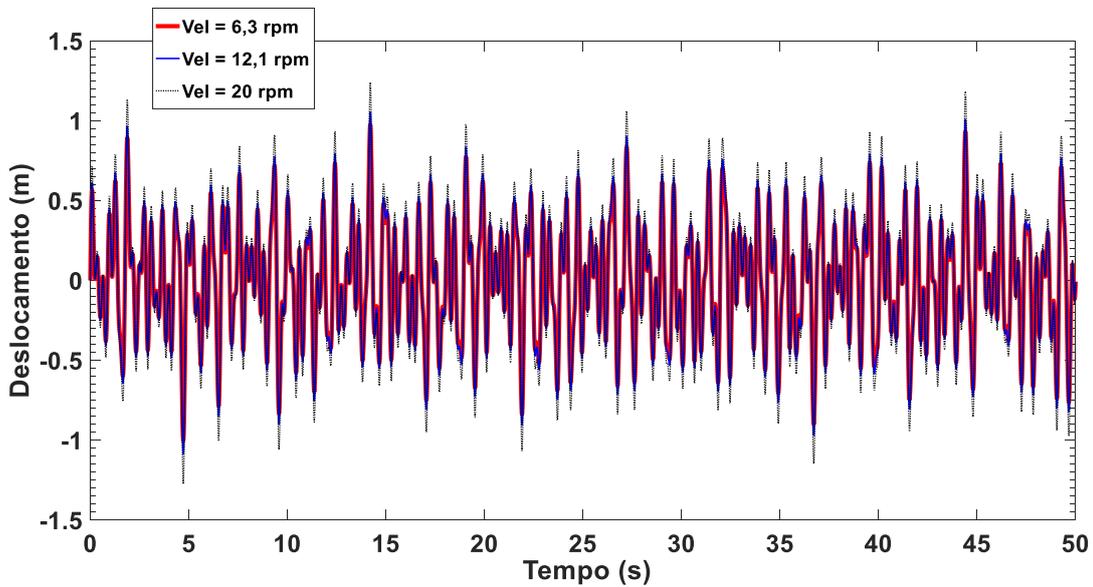


Figura 7-12: Deslocamentos da pá 1 na direção fora-do-plano para três diferentes velocidades de rotação.

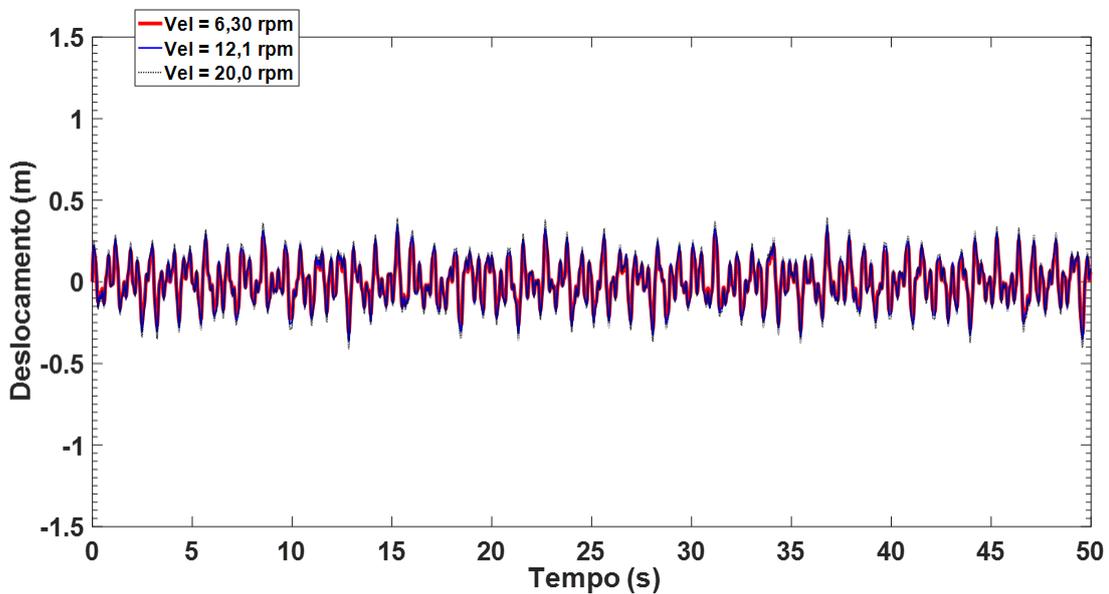


Figura 7-13: Deslocamentos da pá 1 na direção no-plano para três diferentes velocidades de rotação.

É interessante notar que, diferentemente da influência da ISE, os deslocamentos devido ao aumento da velocidade de rotação das pás são mais sentidos nas próprias pás e menos na

torre. Isso porque a influência da rotação na torre ocorre principalmente através da interação (indireta) entre a torre e as pás.

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

8.1 Conclusões

De maneira geral, este trabalho investigou o comportamento dinâmico de aerogeradores. Para isso foram realizados estudos analíticos sobre as respostas dinâmicas da turbina eólica *NREL 5MW* submetida às cargas de vento e terremoto. As influências das condições operacionais, da interação solo-estrutura e da velocidade do rotor na torre e nas pás são examinadas. Com base nos resultados relatados aqui, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

- ❖ Os deslocamentos máximos no topo da torre nas direções fora-do-plano e no-plano quando a turbina eólica gira com uma velocidade de rotor de $12,1 \text{ rpm}$ são **56,42%** e **448,5%** maiores que aqueles quando o vento turbina está na condição estacionada, respectivamente. O pico de deslocamento das pás na direção do plano de rotação é cerca de **5 vezes** o da turbina eólica estacionada nesta mesma direção. Isso porque quando as pás estão estacionadas as cargas na direção fora do plano são muito menores. Adicionalmente, as pás possuem rigidez maior na direção no-plano do que na direção fora-do-plano.
- ❖ Portanto, percebe-se que estudos assumindo que as turbinas eólicas estão na condição estacionada podem resultar em estimativas de resposta estrutural não conservadora, gerando um projeto inseguro dos componentes estruturais. Nas normas de projeto atuais, os fatores de segurança são normalmente usados para explicar as incertezas e as variabilidades nas cargas, métodos de análise e a importância dos componentes estruturais para as turbinas eólicas. Entretanto, seria interessante desenvolver um fator de segurança uniforme que possa ser usado na estimativa de resposta operacional com base nos resultados estacionados; para isso, no entanto, trabalhos de pesquisa mais abrangentes são necessários.
- ❖ As frequências de vibração da torre são significativamente reduzidas quando a ISE é considerada, e seus deslocamentos são aumentados consideravelmente. No entanto, a mesma grandeza de redução da frequência e aumento nos deslocamentos não é verificada nas respostas das pás, em que a ISE tem um efeito menor. Isso pode ser

explicado pelo fato de a torre está em contato direto com o solo, já o efeito da ISE nas pás é resultado de uma interação intermediada pela torre.

- ❖ Analisando-se as respostas de deslocamento da torre e das pás, percebe-se que a ISE influencia substancialmente, aumentando o deslocamento, na direção fora-do-plano. No entanto, a ISE não tem o mesmo efeito nos deslocamentos das pás na direção no-plano.
- ❖ Os deslocamentos da torre e das pás na direção fora-do-plano aumentam com o incremento da velocidade do rotor; o mesmo ocorre para os deslocamentos na direção do plano de rotação. Contudo, é percebido que a influência da rotação nos deslocamentos é maior para a direção no-plano. Isso pode ser explicado pelo fato de que o aumento da rotação aumenta também a força centrífuga, que como já explicado anteriormente, aumenta a rigidez da pá e conseqüentemente auxilia na diminuição do deslocamento fora o do plano. Ao mesmo tempo, a rotação aumenta também a força centrípeta o que contribui para a ampliação do deslocamento no plano da rotação.

Deve-se notar que todas as conclusões acima são obtidas com base na turbina eólica *NREL 5MW*, que é uma das maiores turbinas eólicas do mundo atualmente; assim, elas só podem ser aplicáveis a este grupo. Para aplicar os resultados presentes na prática de engenharia e para orientar os projetos de forma mais ampla (ou seja, incluindo os grupos de pequena e média turbinas eólicas também), são necessárias análises mais abrangentes.

A partir dos objetivos pode-se extrair algumas contribuições importantes deste trabalho. Primeiramente, essa dissertação reúne três análises de aspectos importantes no estudo do comportamento dos aerogeradores, aspectos que podem ser encontrados em trabalhos separados, mas raramente no mesmo estudo. Esses aspectos são: a influência da condição operacional (turbina estacionada e rotacionando), a influência da ISE e a influência da velocidade do rotor.

Adicionalmente, outro fator relevante neste estudo é a utilização de um sismo e um espectro de vento como fonte de vibração externa, algo que dificilmente é encontrado em estudos que utilizam modelos com abordagem lagrangeana.

Por fim, uma outra contribuição deste trabalho é o modelo adaptado, que por possuir bom detalhamento e entendimento simplificado, pode ser utilizado para estudos de respostas de outros tipos de turbinas eólicas, visto que no presente estudo a turbina adotada é a NREL 5MW.

8.2 Sugestões para trabalhos futuros

Ao finalizar o presente trabalho, no intuito de dar continuidade ao tema desenvolvido, propõem-se as seguintes sugestões para pesquisas futuras:

- Simular diferentes casos com turbinas de diferentes propriedades, tanto para condição estacionada quando para operacional. Desta forma, seria possível propor um fator de segurança que possa ser usado na estimativa de resposta operacional a partir de resultados estacionados;
- Calcular a força transmitida pela torre à fundação resultantes basicamente de dois efeitos: carga vertical devido ao peso próprio das estruturas (da torre e do aerogerador) e cargas de momento fletor, momento torçor (torque) e força cortante;
- Avaliar efeitos dinâmicos na torre e no solo, de forma a garantir a eficácia e a vida útil das fundações de aerogeradores resultante dos seguintes casos de carga: a) Peso da torre (operação normal) e ventos em condições normais; b) Peso da torre (operação normal) e ventos em condições extremas; c) Desligamento/acionamento do aerogerador; d) Espectro de carregamento correspondente ao efeito dinâmico/oscilatório do vento (cargas de fadiga).
- Esse trabalho não contemplou o efeito de sombra, ou seja, a excitação na frequência 3P causada pela "sombra" causada na torre quando as pás passam por ela gerando turbulência. Sugere-se a aplicação desta em trabalhos futuros para a verificação da influência dinâmica do efeito de sombra na torre.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, T.; SÖDER, L. An overview of wind energy-status 2002. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, n. 1–2, p. 67–128, 2002.

AHMAD, S. S.; LEW, J.-S.; KEEL, L. H. Robust control of flexible structures against structural damage. *In: IEEE Transactions on Control Systems Technology*. [s.l: s.n.]. v. 8p. 170–182.

ALATI, N.; FAILLA, G.; ARENA, F. Seismic analysis of offshore wind turbines on bottom-fixed support structures. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 373, n. 2035, p. 20140086–20140086, 2015.

ANDERSEN, L. V.; VAHDATIRAD, M. J.; SICHANI, M. T.; SØRENSEN, J. D. Natural frequencies of wind turbines on monopile foundations in clayey soils-A probabilistic approach. **Computers and Geotechnics**, v. 43, p. 1–11, 2012.

ASAREH, M. A.; SCHONBERG, W.; VOLZ, J. Fragility analysis of a 5-MW NREL wind turbine considering aero-elastic and seismic interaction using finite element method. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 120, p. 57–67, 2016.

AUSTIN, S.; JERATH, S. Effect of soil-foundation-structure interaction on the seismic response of wind turbines. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 8, n. 3, p. 323–331, 2017.

BHATTACHARYA, S.; ADHIKARI, S. Experimental validation of soil-structure interaction of offshore wind turbines. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 31, n. 5–6, p. 805–816, 2011.

BHATTACHARYA, S.; MADABHUSHI, S. P. G.; BOLTON, M. D. An alternative mechanism of pile failure in liquefiable deposits during earthquakes. **Géotechnique**, v. 55, n. 3, p. 259–263, 2005.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **Dynamics of Structures**. [s.l: s.n.].

DÍAZ, O.; SUÁREZ, L. E. Seismic analysis of wind turbines. **Earthquake Spectra**, v. 30, n. 2, p. 743–765, 2014.

EVANGELOS I. KATSANOS, S. T. AND C. T. G. Wind turbines and seismic hazard: a

state-of-the-art review. **Wind Energy**, v. 17, n. April 2013, p. 657–669, 2016.

FEIJÓ, B. P.; LIMA, J. B. C. A.; MELO, A. M. C. DE; JR., E. P. Otimização Estrutural de Torres de Aço Tubulares para Geradores Eólicos. **Mecânica Computacional**, v. 29, p. 781–792, 2010.

FITZGERALD, B.; BASU, B. Cable connected active tuned mass dampers for control of in-plane vibrations of wind turbine blades. **Journal of Sound and Vibration**, v. 333, n. 23, p. 5980–6004, 2014.

FITZGERALD, B.; BASU, B. Structural control of wind turbines with soil structure interaction included. **Engineering Structures**, v. 111, p. 131–151, 2016.

GAZETAS, B. G. FORMULAS AND CHARTS FOR IMPEDANCES OF. v. 117, n. 9, p. 1363–1381, 1992.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2016**Gwec. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://files.gwec.net/files/GWR2016.pdf>>.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2018** Gwec. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://files.gwec.net/files/GWR2018.pdf>>.

HANSEN, M. H. Improved modal dynamics of wind turbines to avoid stall-induced vibrations. **Wind Energy**, v. 6, n. 2, p. 179–195, 2003.

HANSEN, M. O. L. **Aerodynamics of Wind Turbines**. [s.l: s.n.]. v. 130

HARTE, M.; BASU, B.; NIELSEN, S. R. K. Dynamic analysis of wind turbines including soil-structure interaction. **Engineering Structures**, v. 45, p. 509–518, 2012.

HAU, E. **Wind Turbines**. [s.l: s.n.].

HONGWANG, M. Seismic analysis for wind turbines including soil-structure interaction combining vertical and horizontal earthquake. **15th World Conference on Earthquake Engineering**, n. 2009, 2012.

KAKUYA, H.; SHIRAIISHI, T.; YOSHIDA, S.; UTSUNOMIYA, T.; SATO, I. Experimental results of floating platform vibration control with mode change function using full-scale spar-type floating offshore wind turbine. **Wind Engineering**, p. 0309524X1773733, 2017.

- KHOSRAVIKIA, F.; MAHSULI, M.; GHANNAD, M. A. Comparative Assessment of Soil-Structure Interaction Regulations of ASCE 7-16 and ASCE 7-10. n. January, p. 388–399, 2018.
- KIM, W. S.; JEOUNG, C.; LEE, K. M.; LEE, J. H. Seismic Analysis of Concrete Conical Foundation for 5 MW Wind Turbine. **Advanced Materials Research**, v. 831, p. 133–136, 2013.
- KJØRLAUG, R. A.; KAYNIA, A. M.; ELGAMAL, A. Seismic Response of Wind Turbines due to Earthquake and Wind Loading. **The EUROSDYN 9th International Conference on Structural Dynamics**, n. July, p. 3627–3634, 2014.
- KOURKOULIS, R. S.; LEKKAKIS, P. C.; GELAGOTI, F. M.; KAYNIA, A. M. Suction caisson foundations for offshore wind turbines subjected to wave and earthquake loading: effect of soil–foundation interface. **Géotechnique**, v. 64, n. 3, p. 171–185, 2014.
- LETCHER, T. M. **Wind Energy Engineering: A handbook for onshore and offshore wind turbines**. [s.l.: s.n.].
- LOMBARDI, D.; BHATTACHARYA, S.; MUIR WOOD, D. Dynamic soil-structure interaction of monopile supported wind turbines in cohesive soil. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 49, p. 165–180, 2013.
- MURTAGH, P. J.; GHOSH, A.; BASU, B.; BRODERICK, B. M. Passive control of wind turbine vibrations including blade/tower interaction and rotationally sampled turbulence. **Wind Energy**, v. 11, n. 4, p. 305–317, 2008.
- NEHRP CONSULTANTS JOINT VENTURE. Soil-Structure Interaction for Building Structures. **Nist Gcr**, v. 12, p. 917–21, 2012.
- PAÏDOUSSIS, M. P.; SEMLER, C. Non-linear dynamics of a fluid-conveying cantilevered pipe with a small mass attached at the free end. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, v. 33, n. 1, p. 15–32, 1998.
- SANTANGELO, F.; FAILLA, G.; SANTINI, A.; ARENA, F. Time-domain uncoupled analyses for seismic assessment of land-based wind turbines. **Engineering Structures**, v. 123, p. 275–299, 2016.
- SATARI, P. E. M. AL.; HUSSAIN, S. E. S. Vibration Based Wind Turbine Tower

Foundation Design Utilizing Soil-Foundation-Structure Interaction. **AIP Conference Proceedings**, v. 1020, n. 1, p. 577–584, 2008.

STAINO, A.; BASU, B. Dynamics and control of vibrations in wind turbines with variable rotor speed. **Engineering Structures**, v. 56, p. 58–67, 2013.

SUN, C.; JAHANGIRI, V. Bi-directional vibration control of offshore wind turbines using a 3D pendulum tuned mass damper. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 105, p. 338–360, 2018.

TENG, W.; WANG, X.; MENG, Y.; SHI, W. Dynamic clustering equivalent model of wind turbines based on spanning tree. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 7, n. 6, 2015.

WANG, W.; WANG, B. Model Test and Numerical Analysis of an Offshore Bottom Fixed Pentapod Wind Turbine under Seismic Loads. p. 1–11, 2017.

WITCHER, D. Seismic analysis of wind turbines in the time domain. **Wind Energy**, v. 8, n. 1, p. 81–91, 2005.

ZHANG, Z.; STAINO, A.; BASU, B.; NIELSEN, S. R. K. Performance evaluation of full-scale tuned liquid dampers (TLDs) for vibration control of large wind turbines using real-time hybrid testing. **Engineering Structures**, v. 126, p. 417–431, 2016.

ZUO, H.; BI, K.; HAO, H. Dynamic analyses of operating offshore wind turbines including soil-structure interaction. **Engineering Structures**, v. 157, n. June 2017, p. 42–62, 2018a.

_____. Influence of Soil-Structure Interaction on the Dynamic Behaviours of Offshore Wind Turbine. February, 2018b.

Anexo A

Os dados da pá aqui mostrados na Figura 1 foram obtidos do trabalho de (Sun e Jahangiri, 2018).

Radius (m)	BIFract (°)	AeroCent (°)	StrcTwst (°)	BMassDen (kg/m)	FlpStff (N/m²)	EdgStff (N/m²)	GJStff (Nm²)	EASStff (N)	Alpha (°)	FlpIner (kgm)	EdgIner (kgm)	PrescrRef (m)	PreswRef (m)	FlpCoOf (m)	EdgCoOf (m)	FlpEAOI (m)	EdgEAOI (m)
1.50	0.00000	0.25000	13.308	678.935	18110.00E+6	18113.60E+6	5564.40E+6	9729.48E+6	0.0	972.86	973.04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00017	0.0
1.70	0.00325	0.25000	13.308	678.935	18110.00E+6	18113.60E+6	5564.40E+6	9729.48E+6	0.0	972.86	973.04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00017	0.0
2.70	0.01951	0.24951	13.308	773.363	19424.90E+6	19558.60E+6	5431.59E+6	10789.50E+6	0.0	1091.52	1066.38	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.02309	0.0
3.70	0.03577	0.24510	13.308	740.550	17455.90E+6	19497.80E+6	4993.98E+6	10067.23E+6	0.0	966.09	1047.36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00344	0.0
4.70	0.05203	0.23284	13.308	740.042	15287.40E+6	19788.80E+6	4666.59E+6	9867.78E+6	0.0	873.81	1099.75	0.0	0.0	0.0	0.0	0.04345	0.0
5.70	0.06829	0.22059	13.308	592.496	10782.40E+6	14858.50E+6	3474.71E+6	7607.88E+6	0.0	648.55	873.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.05893	0.0
6.70	0.08455	0.20833	13.308	450.275	7229.72E+6	10220.60E+6	2323.54E+6	5491.25E+6	0.0	456.78	641.49	0.0	0.0	0.0	0.0	0.06944	0.0
7.70	0.10081	0.19608	13.308	424.054	6309.54E+6	9144.70E+6	1907.87E+6	4971.30E+6	0.0	400.53	593.73	0.0	0.0	0.0	0.0	0.07718	0.0
8.70	0.11707	0.18382	13.308	400.638	5528.36E+6	8063.16E+6	1570.36E+6	4493.95E+6	0.0	351.61	547.18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.08394	0.0
9.70	0.13335	0.17156	13.308	382.062	4980.06E+6	6884.44E+6	1158.20E+6	4034.80E+6	0.0	316.12	490.84	0.0	0.0	0.0	0.0	0.10174	0.0
10.70	0.14959	0.15931	13.308	399.655	4936.84E+6	7009.18E+6	1002.12E+6	4037.29E+6	0.0	303.60	503.86	0.0	0.0	0.0	0.0	0.10758	0.0
11.70	0.16585	0.14706	13.308	426.321	4691.66E+6	7167.68E+6	855.90E+6	4169.72E+6	0.0	289.24	544.70	0.0	0.0	0.0	0.0	0.15829	0.0
12.70	0.18211	0.13481	13.181	416.820	3949.46E+6	7271.66E+6	672.27E+6	4082.35E+6	0.0	246.57	569.90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.22235	0.0
13.70	0.19837	0.12500	12.849	406.186	3386.52E+6	7081.70E+6	547.49E+6	4085.97E+6	0.0	215.91	601.28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.30746	0.0
14.70	0.21465	0.12500	12.192	381.420	2933.74E+6	6244.53E+6	448.84E+6	3668.34E+6	0.0	187.11	546.56	0.0	0.0	0.0	0.0	0.30386	0.0
15.70	0.23089	0.12500	11.561	352.822	2568.96E+6	5048.96E+6	335.92E+6	3147.76E+6	0.0	160.84	468.71	0.0	0.0	0.0	0.0	0.26519	0.0
16.70	0.24715	0.12500	11.072	349.477	2388.65E+6	4948.49E+6	311.35E+6	3011.58E+6	0.0	148.56	453.76	0.0	0.0	0.0	0.0	0.25941	0.0
17.70	0.26341	0.12500	10.792	346.536	2271.99E+6	4808.02E+6	291.94E+6	2882.62E+6	0.0	140.30	436.22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.25007	0.0
19.70	0.29595	0.12500	10.232	339.333	2050.05E+6	4501.40E+6	261.00E+6	2613.97E+6	0.0	124.61	398.18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.23155	0.0
21.70	0.32846	0.12500	9.672	330.004	1828.25E+6	4244.07E+6	228.82E+6	2357.48E+6	0.0	109.42	362.06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.20382	0.0
23.70	0.36098	0.12500	9.110	321.886	1598.71E+6	3995.50E+6	207.15E+6	2146.95E+6	0.0	94.36	335.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.19374	0.0
25.70	0.39350	0.12500	8.534	313.820	1361.93E+6	3750.78E+6	174.38E+6	1944.09E+6	0.0	80.24	308.57	0.0	0.0	0.0	0.0	0.18323	0.0
27.70	0.42602	0.12500	7.932	294.734	1102.38E+6	3447.14E+6	144.47E+6	1632.70E+6	0.0	62.67	263.87	0.0	0.0	0.0	0.0	0.14994	0.0
29.70	0.45855	0.12500	7.321	287.120	875.80E+6	3139.07E+6	119.98E+6	1432.40E+6	0.0	49.42	237.06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.15421	0.0
31.70	0.49106	0.12500	6.711	263.343	681.30E+6	2734.24E+6	81.19E+6	1168.76E+6	0.0	37.34	196.41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.13252	0.0
33.70	0.52358	0.12500	6.122	253.207	534.72E+6	2554.87E+6	69.09E+6	1047.43E+6	0.0	29.14	180.34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.13313	0.0
35.70	0.55610	0.12500	5.546	241.666	408.90E+6	2334.03E+6	57.45E+6	922.95E+6	0.0	22.16	162.43	0.0	0.0	0.0	0.0	0.14035	0.0
37.70	0.58862	0.12500	4.971	220.638	314.54E+6	1828.73E+6	45.92E+6	760.82E+6	0.0	17.33	134.83	0.0	0.0	0.0	0.0	0.13950	0.0
39.70	0.62115	0.12500	4.401	200.293	238.63E+6	1584.10E+6	35.98E+6	648.03E+6	0.0	13.30	116.30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.15134	0.0
41.70	0.65366	0.12500	3.834	179.404	175.88E+6	1323.36E+6	27.44E+6	539.70E+6	0.0	9.96	97.98	0.0	0.0	0.0	0.0	0.17418	0.0
43.70	0.68618	0.12500	3.332	165.094	126.01E+6	1183.68E+6	20.90E+6	531.15E+6	0.0	7.30	98.93	0.0	0.0	0.0	0.0	0.24922	0.0
45.70	0.71870	0.12500	2.890	154.411	107.26E+6	1020.16E+6	18.54E+6	460.01E+6	0.0	6.22	85.78	0.0	0.0	0.0	0.0	0.26022	0.0
47.70	0.75122	0.12500	2.503	138.935	90.88E+6	797.81E+6	16.28E+6	375.75E+6	0.0	5.19	69.96	0.0	0.0	0.0	0.0	0.22554	0.0
49.70	0.78374	0.12500	2.116	129.555	76.31E+6	709.61E+6	14.53E+6	328.89E+6	0.0	4.38	61.41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.22795	0.0
51.70	0.81626	0.12500	1.730	107.264	61.05E+6	518.19E+6	9.07E+6	244.04E+6	0.0	3.36	45.44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.20600	0.0
53.70	0.84878	0.12500	1.342	98.776	49.48E+6	454.87E+6	8.06E+6	211.60E+6	0.0	2.75	39.57	0.0	0.0	0.0	0.0	0.21662	0.0
55.70	0.88130	0.12500	0.954	90.248	39.36E+6	395.12E+6	7.08E+6	181.52E+6	0.0	2.21	34.09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.22784	0.0
56.70	0.89756	0.12500	0.760	83.001	34.67E+6	353.72E+6	6.09E+6	160.25E+6	0.0	1.93	30.12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.23124	0.0
57.70	0.91382	0.12500	0.574	72.906	30.41E+6	304.73E+6	5.75E+6	109.23E+6	0.0	1.69	20.15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.14826	0.0
58.70	0.93008	0.12500	0.404	68.772	26.52E+6	281.42E+6	5.33E+6	100.08E+6	0.0	1.49	18.53	0.0	0.0	0.0	0.0	0.15346	0.0
59.70	0.93821	0.12500	0.319	66.264	23.84E+6	261.71E+6	4.94E+6	92.24E+6	0.0	1.34	17.11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.15382	0.0
59.70	0.94636	0.12500	0.253	59.340	19.63E+6	158.81E+6	4.24E+6	83.23E+6	0.0	1.10	11.55	0.0	0.0	0.0	0.0	0.09470	0.0
60.20	0.95447	0.12500	0.216	55.914	16.00E+6	137.88E+6	3.66E+6	53.32E+6	0.0	0.89	9.77	0.0	0.0	0.0	0.0	0.09018	0.0
60.70	0.96260	0.12500	0.178	52.484	12.83E+6	118.79E+6	3.13E+6	44.53E+6	0.0	0.71	8.19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.08561	0.0
61.20	0.97073	0.12500	0.140	49.114	10.08E+6	101.63E+6	2.64E+6	36.90E+6	0.0	0.56	6.82	0.0	0.0	0.0	0.0	0.08035	0.0
61.70	0.97886	0.12500	0.101	45.818	7.55E+6	85.07E+6	2.17E+6	29.92E+6	0.0	0.42	5.57	0.0	0.0	0.0	0.0	0.07096	0.0
62.20	0.98699	0.12500	0.062	41.669	4.60E+6	64.26E+6	1.58E+6	21.31E+6	0.0	0.25	4.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.05424	0.0
62.70	0.99512	0.12500	0.023	11.453	0.25E+6	6.61E+6	0.25E+6	4.85E+6	0.0	0.04	0.94	0.0	0.0	0.0	0.0	0.05387	0.0
63.00	1.00000	0.12500	0.000	10.319	0.17E+6	5.01E+6	0.19E+6	3.53E+6	0.0	0.02	0.68	0.0	0.0	0.0	0.0	0.05181	0.0

Figura 0-1 - Propriedades da pá ao longo do raio. Fonte: (Sun e Jahangiri, 2018)

Os valores de rigidez e inércia na seção do fora-do-plano e no-plano são representados por “FlpStff”, “EdgStff”, “FlpIner” e “EdgIner” respectivamente. Eles são dados sobre os principais eixos estruturais de cada seção transversal, conforme orientados pelo ângulo de torção estrutural “StrcTwst.”

“GJStff” representa os valores da rigidez de torção da pá. Como os dados da pá não continham informações de rigidez extensional, estimou-se que os valores de rigidez extensiva da pá - “EASStff” - sejam 10^7 vezes o momento médio de inércia da massa em cada seção da pá. Isso veio de uma regra geral derivada de estudos prévios.

Apêndice A

- **Run**

```
clc
clear all

% x_int1 = [0*ones(8,1);zeros(8,1)];
% options = odeset('Refine', 10000, 'RelTol', 0.01);
% [t1,x1] = ode15s(@vdp1,[0:0.01:50],x_int1, options);
% p1=plot(t1,x1(:,3), 'Red');
%
% hold on

x_int1 = [0*ones(10,1);zeros(10,1)];
options = odeset('Refine', 10000, 'RelTol', 0.01);
[t2,x2] = ode15s(@vdp1,[0:0.01:50],x_int1, options);
p2=plot(t2,x2(:,5), 'Red');

hold on

x_int1 = [0*ones(10,1);zeros(10,1)];
options = odeset('Refine', 1000, 'RelTol', 0.02);
[t3,x3] = ode15s(@vdp1,[0:0.01:50],x_int1, options);
p3=plot(t3,x3(:,5), 'Blue');

hold on

x_int1 = [0*ones(10,1);zeros(10,1)];
options = odeset('Refine', 1000, 'RelTol', 0.02);
[t4,x4] = ode15s(@vdp1,[0:0.01:50],x_int1, options);
p4=plot(t4,x4(:,5), 'Black');

% p1.LineWidth=1.5;
p2.LineWidth=3.5;
p3.LineWidth=1.5;
p4.LineWidth=1.2;
```

- **vdp1**

```
function dxdt = vdp1(t,x)
    I = eye(8,8);

    load Centro.mat
    % u = Centro(:,2)*9.80665;

    % a=zeros(1562,1);
    % a=round(t/0.0001)+1;

    A = [
        0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
        0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
        0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
        0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0;
        0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
        0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
```

```

0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1
];

F1 = 'carga total'

c = [
1.045650175*10^5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
0, 1.045650175*10^5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
0, 0, 1.045650175*10^5, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
-1.438583509*10^5*sin(12.1*t), -
1.438583509*10^5*cos(12.1*t+(1/6)*pi),
1.438583509*10^5*sin(12.1*t+(1/3)*pi), 7.193209876*10^9, 0, 0, 0, 0;
0, 0, 0, 0, 1311.088017, 0, 0, 0, 0;
0, 0, 0, 0, 0, 1311.088017, 0, 0, 0;
0, 0, 0, 0, 0, 0, 1311.088017, 0, 0;
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 7.193209876*10^9
];

k = [ 1.429032335*10^15-6.328927189*10^10*cos(12*t), 0, 0, 0,
0.5433128045, 0, 0, 0;
0, 1.429032335*10^15+6.328927189*10^10*sin(12.1*t+(1/6)*pi),
0, 0, 0, 0.5433128045, 0, 0;
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
1.429032335*10^15+6.328927189*10^10*cos(12.1*t+(1/3)*pi), 0, 0, 0,
0.5433128045, 0;
-8.703430232*10^5*cos(12.1*t),
8.703430232*10^5*sin(12.1*t+(1/6)*pi),
8.703430232*10^5*cos(12.1*t+(1/3)*pi), 1.165300000*10^9, 0, 0, 0, 0;
0.5433128045, 0, 0, 0, 0, 1.429032335*10^15-
6.328927189*10^10*cos(12.1*t), 0, 0, 0;
0, 0.5433128045, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
1.429032335*10^15+6.328927189*10^10*sin(12.1*t+(1/6)*pi), 0, 0;
0, 0, 0.5433128045, 0, 0, 0, 0, 0,
1.429032335*10^15+6.328927189*10^10*cos(12.1*t+(1/3)*pi), 0;
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1.165300000*10^9
];

m = [
3671.3183, 0, 0, 5944.559956*cos(12.1*t), 0, 0, 0, 0;
0, 3671.3183, 0, -5944.559956*sin(12.1*t+(1/6)*pi), 0, 0, 0,
0;
0, 0, 3671.3183, -5944.559956*cos(12.1*t+(1/3)*pi), 0, 0, 0,
0;
5944.559956*cos(12.1*t), -5944.559956*sin(12.1*t+(1/6)*pi), -
5944.559956*cos(12.1*t+(1/3)*pi), 6.974660000*10^5, 0, 0, 0, 0;
0, 0, 0, 0, 2699.546477, 0, 0, 4624.670162*cos(12.1*t);
0, 0, 0, 0, 0, 0, 2699.546477, 0, -
4624.670162*sin(12.1*t+(1/6)*pi);
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2699.546477, -
4624.670162*cos(12.1*t+(1/3)*pi);

```

```

0, 0, 0, 0, 4624.670162*cos(12.1*t), -
4624.670162*sin(12.1*t+(1/6)*pi), -4624.670162*cos(12.1*t+(1/3)*pi),
6.974660000*10^5
];

```

```

C=A*m;

```

```

F = F1*C;

```

```

x1 = zeros(8,1);

```

```

x2 = zeros(8,1);

```

```

dxdt_1 = zeros(8,1);

```

```

dxdt_2 = zeros(8,1);

```

```

x1 = x(1:8);

```

```

x2 = x(9:16);

```

```

dxdt_1 = x2;

```

```

dxdt_2 = F/m*ones(8,1) - k/m*x1 - c/m*x2;

```

```

dxdt = [dxdt_2; dxdt_1];

```

```

%t = 0:0.1:200;

```

```

%y_int = [y0*ones(8,1); zeros(8,1)]

```

```

%[t y] = ode45(@vdp1, [0 10], y_int);

```

```

%plot(t,y)

```

Apêndice B

Equações do movimento para cada grau de liberdade do modelo 1 (sem ISE) sem considerar a aplicação de forças externas, ou seja, vibração livre.

Eq. do movimento para Pá 1 – No plano

$$\begin{aligned} & \left[1.11 \cdot 10^9 + 1.99 \cdot 10^9 \cos(14.40t) + 0.50 \sin(14.40t) \right] \cdot (\ddot{q}_1(t)) + \\ & \left[0.006 \cdot \cos(14.40t) \cdot \sin(14.40t) + 6.896 \cdot 10^6 \cos(14.40t)^2 + 5.35 \cdot 10^6 \cos(14.40t) + 0.0020 \cdot \sin(14.40t) + 0.010 \left(\frac{d}{dt} q_{n_1}(t) \right) \cos(14.40t) - 3.85 \cdot 10^7 \left(\frac{d}{dt} q_{n_1}(t) \right) \sin(14.40t) + 16.58 \cdot 10^5 + 9.47 \cdot 10^6 \cdot q_2(t) \right] (\dot{q}_1(t)) \\ & \left[3.44 \cdot 10^8 + 48752.61 \cdot \cos(14.40t) + 4.12 \cdot 10^7 \right] (q_1(t)) \end{aligned}$$

Eq. do movimento para Pá 1 – Fora do plano

$$\begin{aligned} & \left[2.67 \cdot 10^6 \left(\frac{d}{dt} q_{n_2}(t) \right) \right] \cdot (\ddot{q}_2(t)) + \\ & \left[9.47 \cdot 10^6 \cdot q_1(t) + 16.58 \cdot 10^5 \right] (\dot{q}_2(t)) \\ & \left[48752.6 \cdot \cos(14.4t) + 4.12 \cdot 10^7 \right] (q_2(t)) \end{aligned}$$

Eq. do movimento para Pá 2 – No plano

$$\begin{aligned} & \left[1.11 \cdot 10^9 - 9.93 \cdot 10^8 \cos(14.40t) - 1.72 \cdot 10^9 \cdot \sin(14.40t) \right] \cdot (\ddot{q}_2(t)) + \\ & \left[5.97 \cdot 10^6 \cos(14.4t) \cdot \sin(14.4t) + 6.83 \cdot 10^6 - 3.45 \cdot 10^6 \cdot \cos(14.4t)^2 - 2.67 \cdot 10^6 \cdot \cos(14.4t) + 4.63 \cdot 10^6 \cdot \sin(14.40t) - 3.33 \cdot 10^7 \left(\frac{d}{dt} q_{n_1}(t) \right) \cos(14.40t) + 1.92 \cdot 10^7 \left(\frac{d}{dt} q_{n_1}(t) \right) \sin(14.4t) + 9.47 \cdot 10^6 q_2(t) \right] (\dot{q}_2(t)) \\ & \left[3.44 \cdot 10^8 - 24376.31 \cdot \cos(14.40t) - 42221 \cdot \sin(14.40t) + 4.12 \cdot 10^7 \right] (q_2(t)) \end{aligned}$$

Eq. do movimento para Pá 2 – Fora do plano

$$\begin{aligned} & \left[2.67 \cdot 10^6 \left(\frac{d}{dt} qn_2(t) \right) \right] \cdot (\ddot{q}_2(t)) + \\ & \left[16.58 \cdot 10^5 + 9.47 \cdot 10^6 qI_2(t) \right] (\dot{q}_2(t)) \\ & \left[-42221.0 \cdot \sin(14.40t) - 24376.31 \cdot \cos(14.40t) + 4.12 \cdot 10^7 \right] (q_2(t)) \end{aligned}$$

Eq. do movimento para Pá 3 – No plano

$$\begin{aligned} & \left[-9.93 \cdot 10^8 \cdot \cos(14.40t) + 1.72 \cdot 10^9 \cdot \sin(14.40t) \right] \cdot (\ddot{I}_3(t)) + \\ & \left[+3.33 \cdot 10^7 \left(\frac{d}{dt} qn_1(t) \right) \cos(14.40t) + 9.47 \cdot 10^6 q_2(t) - 3.45 \cdot 10^6 \cos(14.40t)^2 + 1.92 \cdot 10^7 \left(\frac{d}{dt} qn_1(t) \right) \sin(14.40t) - 5.97 \cdot 10^6 \cos(14.4t) \cdot \sin(14.4t) + 6.83 \cdot 10^6 - 2.67 \cdot 10^6 \cos(14.4t) + 4.63 \cdot 10^6 \sin(14.4t) \right] (\dot{I}_3(t)) \\ & \left[3.44 \cdot 10^8 + 4.12 \cdot 10^7 + 24376.31 \cdot \cos(14.4t) + 42221.0 \cdot \sin(14.4t) \right] (qI_3(t)) \end{aligned}$$

Eq. do movimento para Pá 3 – Fora do plano

$$\begin{aligned} & \left[2.67 \cdot 10^6 \left(\frac{d}{dt} qn_2(t) \right) \right] \cdot (\ddot{q}_3(t)) + \\ & \left[9.47 \cdot 10^6 \cdot qI_3(t) + 16.58 \cdot 10^5 \right] (\dot{q}_3(t)) \\ & \left[-24376.31 \cdot q_2(t) \cos(14.4t) + 42221.0 \cdot \sin(14.40t) + 4.12 \cdot 10^7 \right] (q_3(t)) \end{aligned}$$

Eq. do movimento para Torre – No plano

$$\begin{aligned} & \left[-3.33 \cdot 10^7 qI_2(t) \cdot \cos(14.4t) + 1.92 \cdot 10^7 * qI_2(t) \cdot \sin(14.4t) + 3.33 \cdot 10^7 qI_3(t) \cdot \cos(14.4t) + 1.92 \cdot 10^7 qI_3(t) \cdot \sin(14.4t) + 0.01 \cdot qI_1(t) \cos(14.40t) - 3.85 \cdot 10^7 qI_1(t) \cdot \sin(14.40t) \right] \cdot (\ddot{q}n_1(t)) + \\ & \left[-(2 \cdot 0.0029) \cdot \sin(14.4t) \cdot \cos(14.4t) + (2 \cdot 5.30) \cdot 10^6 - (2 \cdot 0.00354) \cdot \cos(14.4t)^2 \right] (\dot{q}n_1(t)) \\ & \left[2.620 \cdot 10^7 \right] (qn_1(t)) \end{aligned}$$

Eq. do movimento para Torre – Fora do plano

$$\begin{aligned} & \left[2.67 \cdot 10^6 \left(\frac{d}{dt} q2_1(t) \right) + 2.67 \cdot 10^6 \left(\frac{d}{dt} q2_3(t) \right) \right] \cdot (\ddot{q}n_2(t)) + \\ & \left[2.09 \cdot 10^7 \right] (\dot{q}n_2(t)) \\ & \left[52689.0 \right] (qn_2(t)) \end{aligned}$$