

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

OYAMA DOUGLAS QUEIROZ DE OLIVEIRA FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE ÁREAS DE ENSAIOS E TESTES
DE AEROGERADORES**

VIRTUS IMPAVIDA

RECIFE

2017

OYAMA DOUGLAS QUEIROZ DE OLIVEIRA FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE ÁREAS DE ENSAIOS E TESTES
DE AEROGERADORES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPE para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia

Orientador: **Prof. Dr. Alex Maurício Araújo**

Coorientador: **Prof. Dr. Alexandre Carlos Araújo da Costa**

RECIFE

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

O48d Oliveira Filho, Oyama Douglas Queiroz de.

Desenvolvimento de uma metodologia para seleção de áreas de ensaios e testes de aerogeradores / Oyama Douglas Queiroz de Oliveira Filho - 2017.

209 folhas,

Orientador: Prof. Dr. Alex Maurício Araújo.

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Carlos Araújo da Costa.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica, 2017.

Inclui Referências, Apêndices e Anexos.

1. Engenharia Mecânica. 2. Certificação. 3. Aerogeradores. 4. Área de Ensaio. 5. Weibull. I. Araújo, Alex Maurício. (Orientador). II. Costa, Alexandre Carlos Araújo da (Coorientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-386

27 de outubro de 2017.

“DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE ÁREAS DE ENSAIOS E TESTES
DE AEROGERADORES”

OYAMA DOUGLAS QUEIROZ DE OLIVEIRA FILHO

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA
MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. ALEXANDRE CARLOS ARAÚJO DA COSTA
COORIENTADOR

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO (UFPE)

Prof. Dr. ALEXANDRE CARLOS ARAÚJO DA COSTA (UFPE)

Prof. Dr. JANARDAN SINGH ROHATGI (UFPE)

Prof. Dr. EDWIN ALTHOR JURGEN NIELING LUNDGREN (UFPE)

Prof. Dr. PEDRO ANDRÉ CARVALHO ROSAS (UFPE)

Profª Drª DÓRIS REGINA AIRES VELEDA (UFPE)

À minha família, dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus...

A minha família.

Ao professor e orientador Alex Maurício pela colaboração, paciência e conhecimento.

Ao coorientador Alexandre Costa pelo suporte e conhecimento passado.

Aos demais professores que fizeram parte dessa evolução: Armando Lúcio, Pedro Rosas, Maurílio José, Ana Rosa, Edwin Althor, Janardan Rohatgi, Armando Shinohara, Olga Vilela e Dóris Veleda.

Aos amigos do dia-a-dia: Gilberto Martins, Lucas Iolanda, Candido Requião, Augusto Coutinho, Cristiano Leal, Pedro Henrique Arruda, Wênio Alencar, Eduardo Real, Guilherme Rocha e Ciro Cordeiro.

Aos que de alguma forma contribuíram: Rafael Luz, Marcos André, Aigbokhan, Alberto Aquino, Frederico Steinmetz, Raul Moraes, Heles Pereira, Roberto Alécio, Antônio Soares, Eduardo Rocha e José Manoel.

A Leonardo Aquino e Valentin Perruci pela amizade e suporte na programação.

A todos do Laboratório de Fluidos e do Centro de Energias Renováveis da UFPE.

Ao CNPq e CAPES pelo apoio financeiro à pesquisa e a SUDENE através do Projeto “Anteprojeto da Área de Ensaio do CER-UFPE para Aerogeradores de Pequena e Média Potência visando à Geração Distribuída” amparado pelo TED e celebrado com a UFPE em 2015 através do processo 59334.00241/2015-03.

Meus sinceros agradecimentos.

“ O fato de não termos conhecimento sobre algo não significa que esse algo não exista! ”

RESUMO

Esta tese tem por objetivo principal apresentar uma metodologia para identificar potenciais áreas de ensaios a partir de duas variáveis: o fator de forma de Weibull, k , e a velocidade média anual, V_m . Essa metodologia é aplicada para locais sem medições anemométricas e consiste em selecionar o par k e V_m , para a estimativa do parâmetro de escala de Weibull, c , e de sua distribuição de frequência. Com isso, verifica-se o número de ocorrências de determinada velocidade de vento, V , confrontando o número de horas ocorridas com as horas necessárias para se realizar um determinado ensaio, segundo as Normas IEC 61400. Depois, utiliza-se os dados do mapa eólico em formato GIS, contendo informações do k e V_m , para identificar/selecionar o local da área de ensaios e testes. Além das simulações para mostrar a viabilidade do par k e V_m , confecção de um mapa para identificação/seleção da potencial área de ensaio, foram desenvolvidos também dois estudos de caso: o primeiro, evidenciando a consistência (validação) da metodologia através de uma análise comparativa com a área do Projeto PILACAS e o segundo selecionando-se uma área de ensaios utilizando critérios qualitativos além do critério de velocidade do vento. Os resultados mostraram que uma análise multicritérios deve ser realizada após a seleção do potencial local pelo critério de velocidade do vento e que a metodologia pode ser aplicada adequadamente em qualquer localidade como ponto de partida para seleção de uma área de ensaios de aerogeradores.

Palavras-chave: Certificação. Aerogeradores. Área de ensaios. Weibull.

ABSTRACT

This thesis aims to present a methodology to identify a potential testing site from two variables: the Weibull form factor, k , and the annual mean wind speed, V_m . This methodology is applied to sites without anemometric measurements and consists of selecting the k and V_m pair for the estimation of the Weibull scale parameter, c , and the frequency distribution. Thus, the number of occurrences of a given wind speed, V , is checked by comparing the number of hours with the hours required to perform a given test in accordance with IEC 61400. Then, the wind map data used in GIS format, containing k e V_m information, to identify/select the location of the testing site. In addition to the simulations to show the feasibility of the pair k e V_m , making a map for visualization/selection of the potential testing site, two case studies were also developed: the first, evidencing the consistency of the methodology through a comparative analysis with the PILACAS Project area and the second, selecting a test area using qualitative criteria beyond the criterion of wind speed. The results showed that a multicriteria analysis should be performed after the local potential selection by the wind speed criterion and that the methodology can be properly applied at any location as the starting point for the selection of a wind turbine testing site.

Keywords: Certification. Wind turbines. Testing site. Weibull.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	PORTE DE AEROGERADORES	14
1.2	HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DOS APPS	17
1.2.1	Os moinhos de vento	17
1.2.2	Início da utilização da energia eólica para geração de eletricidade	21
1.2.2.1	Dinamarca	23
1.2.2.2	Estados Unidos	26
1.2.2.3	Austrália	29
1.2.2.4	Finlândia	29
1.2.2.5	Canadá	30
1.2.2.6	Inglaterra	32
1.2.2.7	França	33
1.2.2.8	Alemanha	34
1.2.2.9	Rússia	34
1.2.2.10	Brasil	35
1.2.3	Ressurgimento da energia eólica	36
1.2.4	Cenário atual dos APPs	38
1.3	JUSTIFICATIVAS	40
1.4	OBJETIVOS.....	42
1.4.1	Objetivo Geral	42
1.4.2	Objetivos Específicos.....	42
1.5	ESTRUTURAÇÃO DA TESE	43

1.6	RESUMO DO CAPÍTULO 1	43
2	EVOLUÇÃO DAS ÁREAS DE ENSAIOS PARA CERTIFICAÇÃO	45
2.1	CERTIFICAÇÃO.....	45
2.2	ENSAIO E TESTE.....	46
2.3	ESTAÇÃO DE ENSAIOS DE ROCKY FLATS	47
2.4	ESTAÇÃO DE ENSAIOS DO DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA)	50
2.5	ESTAÇÃO DE ENSAIOS DO RISØ	50
2.5.1	DTU Risø Campus.....	51
2.5.2	Østerild - National Test Centre for Large Wind Turbines	52
2.5.3	Centro de testes para grandes aerogeradores em Høvsøre	54
2.6	ESTAÇÃO DE ENSAIOS ATLANTIC WIND TEST SITE (AWTS)	55
2.7	ESTAÇÃO DE ENSAIOS NATIONAL WIND TECHNOLOGY CENTER (NWTC).....	57
2.7.1	Projeto dos Regional Testing Center (RTC).....	58
2.7.2	Wind Technology Testing Center (WTTC)	59
2.7.3	Scaled Wind Farm Technology Facility (SWiFT)	61
2.7.4	Clemson University SCE&G Energy Innovation Center	61
2.8	ESTAÇÃO DE ENSAIOS NATIONAL WIND ENERGY CENTRE (TÜVNEL)	62
2.9	ESTAÇÃO DE ENSAIOS DA UNDERWRITERS LABORATORY (UL)	64
2.10	ESTAÇÃO DE ENSAIOS DO INSTITUTO FRAUNHOFER IWES NORTHWEST.....	65
2.11	CENTRO DE INVESTIGACIONES ENERGÉTICAS, MEDIOAMBIENTALES Y TECNOLÓGICAS (CIEMAT)	66
2.12	ESTAÇÃO DE ENSAIOS ENERGY RESEARCH CENTRE OF THE NETHERLANDS (ECN)....	70
2.13	CENTRE FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES AND SAVING	74
2.13.1	Demonstration Wind Farm.....	74

2.13.2	Monitoramento da operação	75
2.13.3	Laboratórios e serviços do CRES	76
2.14	CENTRE FOR WIND ENERGY TECHNOLOGY (C-WET).....	77
2.15	CHINA GENERAL CERTIFICATION CENTER (CGC)	79
2.16	ENTIDADES CERTIFICADORAS	81
2.16.1	Small Wind Certification Council (SWCC)	82
2.16.2	Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK).....	84
2.16.3	Technischer Überwachungsverein (TÜV Rheinland)	84
2.16.4	Det Norske Veritas Germanischer Lloyd (DNV GL).....	84
2.16.5	Underwriters Laboratory (UL)	86
2.16.6	TD Engineering.....	86
2.16.7	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO)	87
2.17	RESUMO DO CAPÍTULO 2	89
3	EXPERIÊNCIA DE CAMPO	91
3.1	O PROJETO PILACAS.....	91
3.2	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO PILACAS	93
3.3	TRABALHOS REALIZADOS.....	99
3.4	RESUMO DO CAPÍTULO 3	102
4	ANÁLISE DE MERCADO E DAS POLÍTICAS DE INCENTIVO	103
4.1	MERCADO DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE: ATUAL E PROSPECTIVO	103
4.1.1	Brasil	107
4.1.2	Aprendizado do Brasil sobre o mercado dos EUA.....	112
4.2	ANÁLISE DAS ATUAIS POLÍTICAS DE INCENTIVO NO BRASIL	117
4.2.1	Políticas regulatórias.....	117

4.2.2	Incentivos públicos-fiscais.....	118
4.2.3	Financiamentos bancários.....	119
4.2.4	Portaria INMETRO nº 168/2015.....	119
4.2.5	Eólica e solar para geração distribuída.....	120
4.2.6	Considerações.....	121
4.3	RESUMO DO CAPÍTULO 4	122
5	METODOLOGIA.....	124
5.1	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA.....	124
5.2	DESCRIÇÃO DETALHADA DA METODOLOGIA.....	126
5.3	RESUMO DO CAPÍTULO 5	127
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	128
6.1	VIABILIDADE DO ENSAIO DE DESEMPENHO DE POTÊNCIA.....	131
6.2	VIABILIDADE DO ENSAIO DE RUÍDO ACÚSTICO.....	132
6.3	VIABILIDADE DO ENSAIO DE DURAÇÃO.....	133
6.4	VIABILIDADE DO ENSAIO DE SEGURANÇA E FUNÇÃO.....	134
6.5	VIABILIDADE DO ENSAIO DA QUALIDADE DA ENERGIA	135
6.6	VIABILIDADE DE TODOS OS ENSAIOS	136
6.7	POTENCIAIS ÁREAS DE ENSAIOS.....	137
6.8	POTENCIAIS ÁREAS DE ENSAIO PARA DESEMPENHO DE POTÊNCIA.....	137
6.9	POTENCIAIS ÁREAS DE ENSAIO PARA RUÍDO ACÚSTICO.....	139
6.10	POTENCIAIS ÁREAS DE ENSAIO DE DURAÇÃO.....	140
6.11	POTENCIAIS ÁREAS DE ENSAIO PARA SEGURANÇA E FUNÇÃO.....	141
6.12	POTENCIAIS ÁREAS DE ENSAIO PARA QUALIDADE DA ENERGIA.....	142
6.13	POTENCIAIS ÁREAS PARA REALIZAR TODOS OS ENSAIOS	143

6.14	VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA – ESTUDO DE CASO 1	144
6.15	SELEÇÃO DE UM LOCAL PARA A ÁREA DE ENSAIOS – ESTUDO DE CASO 2.....	146
6.16	RESUMO DO CAPÍTULO 6	156
7	CONCLUSÕES	157
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	159
7.2	TRABALHOS PUBLICADOS (2013-2017)	160
7.2.1	Periódicos indexados	160
7.2.2	Anais de Congressos.....	161
	REFERÊNCIAS	163
	APÊNDICE A – Normas internacionais e tipos de certificação	176
	APÊNDICE B – Breve análise dos parâmetros de Weibull.....	195
	APÊNDICE C – Detalhamento dos ensaios utilizados na Metodologia	201
	ANEXO A – Teoria da conversão eólica	203
	ANEXO B – A função gama	206
	ANEXO C – Configuração atual dos APPs de eixo horizontal	207
	ANEXO D – Regiões da área de ensaios obtidas da Metodologia	208
	ANEXO E – Ampliação da Figura 75.....	209

1 INTRODUÇÃO

Nesta seção será apresentado um histórico da evolução dos aerogeradores sob os aspectos tecnológicos e sociais, desde o primeiro cata-vento registrado até a geração de eletricidade. Porém, antes de se começar a falar sobre Turbina Eólica de Pequeno Porte (TEPP ou, em inglês *Small Wind Turbine* – SWT, ou ainda **Aerogerador de Pequeno Porte – APP**), será realizada uma breve avaliação do que significa a expressão “pequeno porte”.

1.1 PORTE DE AEROGERADORES

Aerogeradores são dispositivos que capturam a energia dos ventos e a transforma em energia mecânica ou elétrica (ANEXO A). Ao longo dos anos, os aerogeradores foram sendo aperfeiçoados. No começo (entenda como período A.C.), eram utilizadas para transformas energia cinética dos ventos em energia mecânica. Após séculos de evolução, passaram a gerar eletricidade em larga escala.

No início da utilização de aerogeradores para geração de eletricidade, as potências das máquinas eram da ordem de alguns watts ou quilowatts (geralmente muito menores que 100 kW). Entretanto, suas dimensões geométricas variavam, podendo confundir o leitor deste texto em algum momento na definição de pequeno, médio ou grande porte por ser um objeto “gigante” aos olhos para a época. Vale lembrar também que à época não se tinha uma definição a respeito dos tamanhos de aerogeradores. A palavra “tamanho” a que este texto se refere está mais relacionado à potência.

Até início e meados da década de 1980, a potência típica de uma aerogerador era inferior a 100 kW. No final dos anos 1980 e início dos anos 1990, as potências haviam aumentado de 100 para 500 kW. Além disso, em meados da década de 1990, a faixa de tamanho típico era entre 750 e 1000 kW. E no fim de 1990, a potência dos aerogeradores era de até 2500 kW (HERBERT, INIYAN, *et al.*, 2007, p. 1119). Atualmente (2017), já se utiliza máquinas com potências de 8 MW (WIND POWER MONTHLY, 2014).

Hau (2005, p. 545) e Spera (2009, p. 246) mostram que um APP tem um diâmetro de 20 m ou até 100 kW. A *International Electrotechnical Commission* (IEC) define um pequeno aerogerador por sua área varrida, ou seja, menor que 200 m², o que representa um diâmetro de ≈ 16 m e uma potência de ≈ 50 kW gerando uma tensão de 1000 V CA ou 1500 V CA (WOOD, 2011, p. v; JONKMAN, VAN DAM e FORSYTH, 2003, p. 4; GSÄNGER e PITTELOUD, 2016, p. 11). Lembrando que, na versão da IEC 61400-2 do ano de 1996, essa definição de pequeno porte remetia-se a aerogeradores com área varrida de apenas 40 m² (JONKMAN, VAN DAM e FORSYTH, 2003, p. 1).

Segundo Rolland e Auzane (2012) aerogeradores com menos de 15 m de diâmetro e potência abaixo de 50 kW são classificadas como pequenos. Porém, uma grande parte dessas pequenas máquinas tem um diâmetro em torno de 7 m ou menor e uma potência entre 1 e 10 kW. Aerogeradores de médio porte possuem um diâmetro entre 15 e 30 m e uma potência máxima entre 50 e 250 kW (ROLLAND e AUZANE, 2012, p. 1).

O *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas* (CIEMAT), na tentativa de uniformizar os tamanhos dos aerogeradores, definiu classes baseadas em normas e legislações, através do aspecto dimensional de potência e sua área varrida equivalente (Tabela 1) (WIND ENERGY THE FACTS, 2009).

Tabela 1. Definições de APPs.

Potência Nominal, P_n (kW)	Área Varrida (m ²)	Subcategoria
$P_n < 1$	< 4,9	Pico
$1 < P_n < 7$	< 40	Micro
$7 < P_n < 50$	< 200	Mini
$50 < P_n < 100$	< 300	Ainda sem definição

Fonte: (WIND ENERGY THE FACTS, 2009).

O limite de 100 kW é definido em vários países como a máxima potência que pode se conectada diretamente em redes de baixa tensão (WIND ENERGY THE FACTS, 2009).

De acordo com o *Small Wind World Report* (GSÄNGER e PITTELOUD, 2014, p. 14) a definição de um APP varia de acordo com o país como pode ser verificado na Tabela 2.

Tabela 2. Definições de APPs em vários países.

País	Departamento/Associação	Classificação	Potência Nominal (kW)
Internacional	IEC	SWT	≈ 50 (< 200 m ²)
Canadá	NRCan/CanWEA	Mini WT	0,3-1
		SWT	1-30
China	REEEP	SWT	< 100
Alemanha	BWE	SWT	< 75
Reino Unido	RenewableUK	Micro	0-1,5
		SWT	1,5-15
		SMW	15-100
	MCS	Micro & SWT	< 50
EUA	AWEA	SWT	< 100

Fonte: Adaptado de (GSÄNGER e PITTELOUD, 2014).

IEC – *International Electrotechnical Commission*

NRCan/CanWEA – *Natural Resources Canada/Canadian Wind Energy Association*

REEEP – *Renewable Energy and Energy Efficiency Partnership*

BWE – *Bundesverband WindEnergie eV (German Wind Energy Association)*

MCS – *Microgeneration Certification Scheme*

AWEA – *American Wind Energy Association*

SWT/SMW – *Small Wind Turbine/Small Medium Wind*

Nos EUA por exemplo, no seu *Internal Revenue Service (IRS)*, divulgado na *Notice 2015-4* em janeiro de 2015, forneceu os novos requisitos de desempenho e qualidade para pequenos aerogeradores – definidos por uma potência de até 100 kW – de modo a qualifica-los para os 30% da Taxa de Crédito para investimento federal (*Investment Tax Credit – ITC*) (SMALL WIND CERTIFICATION COUNCIL, 2016; INTERNAL REVENUE SERVICE, 2015). Isso evidencia que o tamanho dos aerogeradores (geométrico ou potência) também depende de interesses políticos/econômicos.

O relatório apresentado pela *International Renewable Energy Agency (IRENA)* em 2016, mostra que aerogeradores de pequeno porte são menores que 50 kW enquanto que aerogeradores de médio porte (AMPs) têm potência de até 250 kW (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2016b, p. 45). Já o Japão considera aerogeradores de pequeno porte como sendo de potência até 20 kW (CLASSNK, 2016).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em sua Regulamentação Normativa (REN) nº 482/2012, alterada pela REN nº 687/2015, que define a microgeração aerogeradores com potência menor ou igual a 75 kW e minigeração maior que 75 kW até 5000 kW (AGÊNCIA

NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015). É bom deixar claro que a ANEEL define no ponto de vista da geração, enquanto que as outras definições se baseiam no aspecto dimensional da máquina (geométrico ou potência). Porém, há um documento da ANEEL onde se define três portes de aerogeradores, em relação à potência, de acordo com o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2005, p. 98): pequenos – potência nominal menor que 500 kW; médios – potência nominal entre 500 kW e 1000 kW; e grandes – potência nominal maior que 1000 kW. Entretanto, esta definição não é convencional, o que a torna não utilizável pelo mercado nem pela academia.

Vale salientar que se deve buscar uma padronização universal dessa definição. Assim, seria mais pertinente diferenciar aerogerador de pequeno porte (APP) do de grande porte (AGP) através da facilidade de compra e montagem do equipamento. Ou seja, um APP seria um equipamento onde o consumidor pudesse comprar e ele mesmo tivesse a capacidade de instalar e operar a máquina com segurança. Ou ainda em relação à conexão, ou seja, se um aerogerador pode ser conectado também à um banco de baterias para geração isolada, este seria denominado APP, senão AGP. Porém, por questões de uniformidade no texto, serão considerados nesse trabalho APPs como sendo as máquinas de até 100 kW de potência nominal, definição que os grandes mercados dessa tecnologia já utilizam como Estados Unidos, China e Europa (GSÄNGER e PITTELOUD, 2016, p. 11). Não obstante, a definição também foi escolhida para representar os APPs devido ao seu aspecto dimensional de potência, já que a IEC define pelo aspecto dimensional geométrico.

1.2 HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DOS APPS

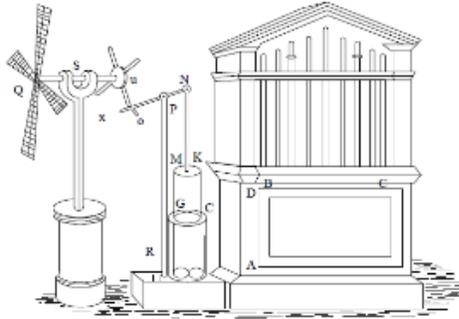
Neste subtópico será realizada uma primeira revisão sobre os moinhos de vento, que foi o início da geração eólica. Após isso, será evidenciada a evolução das APPs para a geração de eletricidade mostrando desde Blyth em 1887 até os dias atuais (2017).

1.2.1 Os moinhos de vento

A primeira referência histórica conhecida por um moinho de vento é de Hero de Alexandria, em seu trabalho de pneumática (WOODCROFT, 1851 *apud* MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009,

p. 11). Acredita-se que Hero viveu entre os séculos 1 A.C. ou o primeiro século D.C.. Seu projeto descreve um dispositivo que fornece ar para um órgão por meio de um moinho de vento. Uma ilustração que acompanha a descrição de Hero é mostrado na Figura 1 (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 11; SPERA, 2009, p. 4).

Figura 1. Desenho do moinho de vento de Hero.



Fonte: (WOODCROFT, 1851 *apud* MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 11).

Além desse moinho de vento, a próxima referência sobre esse assunto, que data do século 9 A.C., diz que moinhos de vento foram utilizados na região Persa de Seistan (atualmente leste do Irã) (Al Masudi conforme relatado por Vowles, 1932 *apud* Manwell, McGowan e Rogers, 2009, p. 11). Al Masudi também relatou uma história que indica que esses moinhos estavam em uso por volta de 644 D.C. e são utilizados até hoje (2016). Possuíam um rotor de eixo vertical, como mostrado na Figura 2 (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 11; SPERA, 2009, p. 7).

Figura 2. Moinho Persa.



Fonte: (VOWLES, 1930 *apud* MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 12)

Os primeiros registros de moinhos de vento (Figura 3) do norte da Europa (Inglaterra) são do século 12, mas provavelmente chegaram no século 10 ou 11 (VOWLES, 1930 *apud* MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 12). Esses moinhos eram diferentes na aparência aos dos Seistan,

e houve uma especulação a respeito de se e como os moinhos de Seistan podem ter influenciado os que apareceram mais tarde na Europa. Não há respostas definitivas, mas Vowles (1930) sugeriu que os Vikings, que viajavam regularmente do norte da Europa para o Oriente Médio, podem ter trazido o conceito em uma de suas viagens de regresso (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 12).

Figura 3. Moinho na Europa.



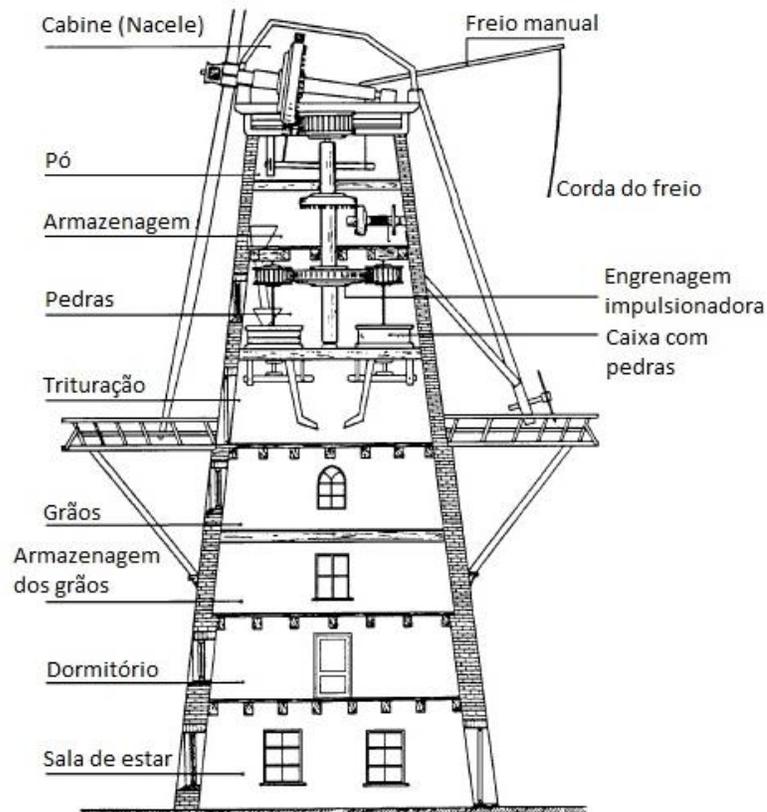
Fonte: (WIKIPEDIA, 2007 *apud* MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 13)

Uma observação interessante para esta evolução inicial diz respeito à mudança na concepção do rotor dos moinhos de Seistan para aqueles do norte da Europa. Os rotores Seistan tinham eixo vertical e se moviam por forças de arrasto. Como tal, eles eram ineficientes e particularmente suscetíveis a danos em ventos fortes. O projeto do norte da Europa tinha eixo horizontal e se moviam pelas forças de sustentação. Como esta transição surgiu não é bem compreendida, mas isso veio a ser de grande importância. Pode-se supor, porém, que a evolução do projeto do rotor do moinho se deu em paralelo com a evolução das velas dos navios durante o primeiro milênio D.C., que passou progressivamente de velas quadradas (primeiros dispositivos de arrasto) para outros tipos de dispositivos que utilizavam sustentação (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 12).

Esses moinhos eram utilizados para tarefas mecânicas, incluindo bombeamento de água, moagem de grãos, serragem de madeira, e ferramentas de potência. Eram geralmente de quatro pás e alguns possuíam controle manual de direção do vento. Uma vista em corte de um típico

moinho europeu está mostrada na Figura 4. O vento continuou a ser uma importante fonte de energia na Europa durante o período imediatamente anterior à Revolução Industrial, mas começou a diminuir em importância após esse tempo. A razão que a energia eólica começou a desaparecer é atribuída principalmente à sua não-despachabilidade (não era armazenada) e sua não transportabilidade (apenas utilização no local) em relação ao carvão (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 12).

Figura 4. Vista em corte de um moinho dinamarquês.



Fonte: Adaptado de (SPERA, 2009, p. 23).

Como os moinhos europeus foram entrando em seus últimos anos de vida, uma outra variante do moinho de vento entrou em uso generalizado nos Estados Unidos. Este tipo de moinho de vento, ilustrado na Figura 5, foi sobretudo utilizado para o bombeamento de água, especialmente no Oeste. Eles foram usados em fazendas para o gado e para fornecer água para as ferrovias a vapor. Estes moinhos foram diferentes, pois, utilizavam múltiplas pás e são muitas vezes referidos como "cata-ventos". Uma de suas características mais significativas foi um sistema de regulação

simples, mas eficaz (resposta rápida à direção do vento, ou seja, controle de *yaw*). Isto permitiu que os aerogeradores fossem autônomas por longos períodos. Tais sistemas renunciavam os sistemas de controle automáticos que são agora uma parte integrante de aerogeradores eólicas modernas (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 14).

Figura 5. Típico “cata-vento” norte americano para bombeamento de água em uma fazenda.



Fonte: (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 15).

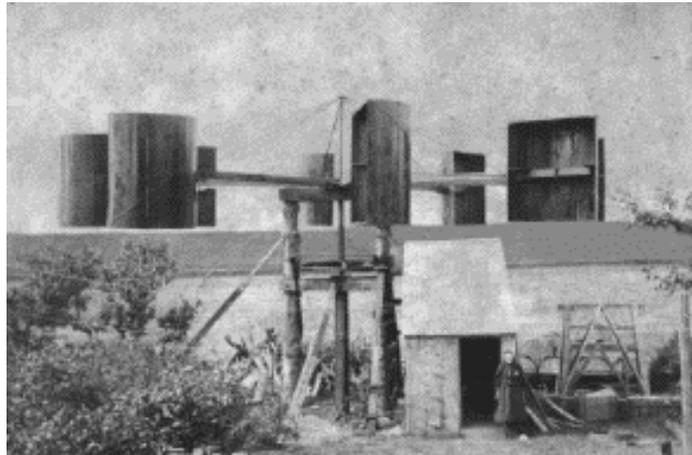
1.2.2 Início da utilização da energia eólica para geração de eletricidade

Quando os geradores elétricos apareceram no final do século 19, era razoável pensar que as pessoas iriam tentar acoplá-los com o rotor dos moinhos de vento. O uso inicial do vento para geração de eletricidade, incluiu o desenvolvimento comercial de sucesso de pequenos aerogeradores (como os Jacobs, vistos adiante) e pesquisas e experimentos que utilizam grandes aerogeradores (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 15).

O primeiro moinho de vento (Figura 6) utilizado para a produção de energia elétrica foi construído na Escócia em julho de 1887 pelo Professor James Blyth da Faculdade de Anderson, Glasgow (atual Universidade de Strathclyde). O aerogerador era de eixo vertical e funcionava por arrasto e seu gerador era um dínamo. Foi montada a 10 m de altura, possuía 8 m de diâmetro e foi instalada no jardim de sua casa de campo em Marykirk em Kincardineshire. Tinha a finalidade de carregar acumuladores desenvolvidos pelo francês Camille Alphonse Faure, para alimentar a

iluminação na casa de campo, tornando-se assim a primeira casa do mundo a ter a sua eletricidade fornecida pelo vento. Blyth ofereceu o excedente de eletricidade para o povo de Marykirk para a iluminação da rua principal, no entanto, eles recusaram a oferta, pois, pensavam que a eletricidade era "obra do diabo". Embora ele, mais tarde, ter construído um aerogerador para fornecer energia de emergência para o asilo local, a invenção não evoluiu devido à tecnologia não ser considerada economicamente viável (PRICE, 2005).

Figura 6. Aerogerador vertical de Blyth.

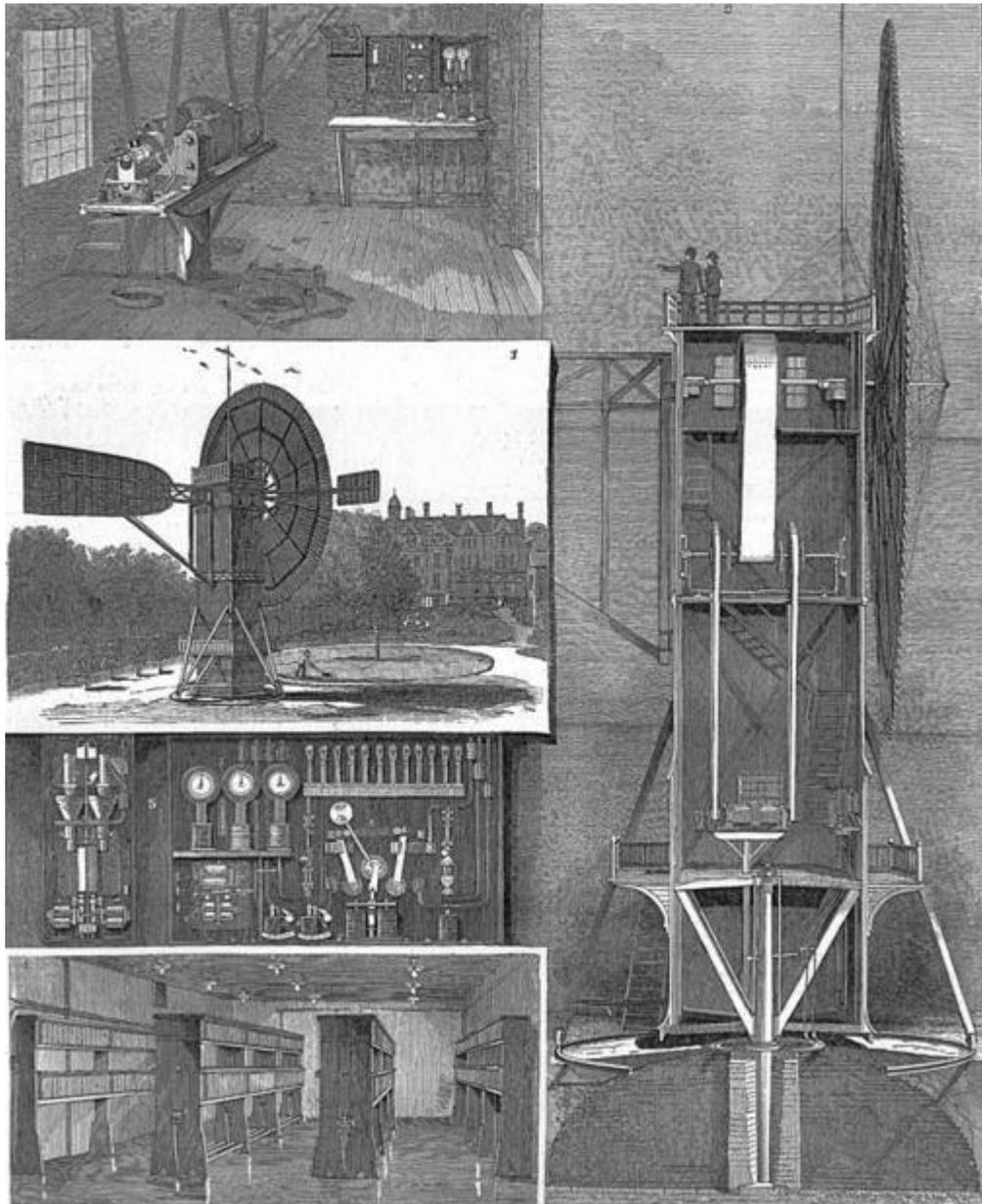


Fonte: (PRICE, 2005, p. 196).

Nos Estados Unidos, o primeiro exemplo mais notável foi construído por Charles Brush em Cleveland, Ohio, em 1888, Figura 7 (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 15; SPERA, 2009, p. 36). O aerogerador de Brush não resultou em qualquer tendência de projeto (modelo), mas, nos anos seguintes, a utilização de pequenos geradores elétricos se tornou generalizada. Ele foi o primeiro aerogerador do mundo operado automaticamente (controle de direção do vento) (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 15). Tinha cerca de 18 m de altura com um diâmetro de 17 m, pesando cerca de 36 toneladas e possuía um dínamo de 12 kW (WIKIPEDIA, 2016).

Porém, tanto Blyth quanto Brush construíram protótipos mostrando que suas invenções de fato tinham uma finalidade e utilidade: a geração de eletricidade através do vento!

Figura 7. Aerogerador de Brush em 1888.



Fonte: (WINDSECTOR, 2011).

1.2.2.1 Dinamarca

A primeira metade do século 20 viu a construção ou concepção de um número de aerogeradores maiores que influenciou substancialmente o desenvolvimento da tecnologia de hoje (2017). Provavelmente, a mais importante sequência desses aerogeradores estava na Dinamarca. Entre 1891 e 1918, Poul La Cour construiu mais de 100 para a geração de energia elétrica na faixa de

potência entre 20-35 kW, Figura 8. Seu projeto foi baseado na última geração de moinhos dinamarqueses. Uma das suas características mais notáveis era que a eletricidade gerada era utilizada para produzir hidrogênio, e o gás de hidrogênio foi em seguida utilizado para a iluminação. Os aerogeradores de La Cour foram seguidos por uma série de aerogeradores produzidos pela *Lykkegaard Ltd.* e *FL Smidth & Co* antes da II Guerra Mundial, que tinham potência entre 30-60 kW (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 15; SPERA, 2009, p. 40). A história segue com o desenvolvimento do aerogeradores de grande porte, da ordem megawatts, que não é objeto deste trabalho.

Figura 8. Um dos aerogeradores de La Cour.



Fonte: (SPERA, 2009, p. 37).

Naturalmente, os dinamarqueses também foram representados com aerogeradores experimentais nos anos cinquenta. Baseando seu conceito sobre o modelo técnico dos aviões, Juul construiu um aerogerador de 200 kW com um diâmetro de rotor de 24 m em Gedser em 1957 (Figura 9) (JUUL 1954 *apud* HAU, 2005, p. 39).

Figura 9. Aerogerador de Juul.



Fonte: (HAU, 2005, p. 41).

Após a crise de energia em 1973, havia apenas um país em que tinha uma certa tradição de sucesso em operar pequenos aerogeradores para geração de energia e este foi a Dinamarca. O conceito técnico básico tinha sido desenvolvido na década de quarenta com uma aplicação relativamente ampla, embora ainda fosse modesto para os padrões atuais. Algumas pequenas e médias empresas na Dinamarca, que estavam ativas na fabricação de máquinas agrícolas (por exemplo Vestas) ou em alguns outros campos de construção de máquinas simples e equipamentos, observaram a oportunidade e começaram a construir pequenos aerogeradores eólicas com rotores de três pás e geradores de indução conectados à rede e vendê-las inicialmente a proprietários privados ou agrícolas, Figura 10 (HAU, 2005, p. 57).

Figura 10. Aplicação rural de um APP na Dinamarca.



Fonte: (HAU, 2005, p. 58)

1.2.2.2 Estados Unidos

Durante os anos 1930 e 40, centenas de milhares de aerogeradores estavam em uso na área rural dos Estados Unidos. Havia mais de 20 fabricantes nessa época (WINCHARGER, 2015).

Os pioneiros no desenvolvimento dos pequenos aerogeradores foram os irmãos Joseph e Marcellus Jacobs que está ilustrado na Figura 11. Estas foram, de certa forma, as sucessoras dos moinhos para bombeamento de água. Após testes iniciais com hélices de aeronaves de duas pás, eles desenvolveram um rotor de três pás com um diâmetro de 4 m, que impulsionou diretamente um gerador de corrente contínua de baixa velocidade. Este aerogerador Jacobs provou ser um projeto de vanguarda e um sucesso de vendas. De 1920 a 1960, dezenas de milhares deles foram produzidos em várias versões de 1,8 a 3 kW de potência nominal. Eles ganharam grande aclamação por sua confiabilidade e baixo custo de manutenção. Um desses aerogeradores foi levado pela *American Almirante Byrd* em 1932 em sua expedição para a Antártida e operada sem manutenção há mais de 22 anos até 1955 (HAU, 2005, p. 33).

Figura 11. Aerogerador Jacobs.



Fonte: (JACOBS, 1961 *apud* MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 16; SPERA, 2009, p. 39).

Eles foram significativos, pois, seus rotores tinham três pás com perfis de aerofólios posteriormente utilizados nos aerogeradores atuais. Outra característica do Jacobs foi a sua utilização em um sistema elétrico de escala residencial, incluindo o armazenamento de baterias. Seu aerogerador é considerado o precursor direto dos pequenos aerogeradores tais como as

máquinas *Bergey* e *Southwest Windpower*. A expansão da rede elétrica central sob os auspícios da *Rural Electrification Administration* durante a década de 1930 marcou o início do fim do uso generalizado de pequenos aerogeradores, pelo menos naquele momento (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 15).

Uma década antes do início desse programa de eletrificação rural, os primeiros esforços foram envidados nos EUA para desenvolver aerogerador avançados. Como o objetivo declarado era de fornecer energia para os consumidores privados que ainda não foram conectados à rede, o desenvolvimento estava concentrado em pequenos aerogeradores com potências nominais de alguns quilowatts. Estas pequenas máquinas, que ficaram conhecidas como "carregadores de vento", foram usadas para recarregar as baterias, sendo uma fonte de alimentação modesta, em assentamentos rurais e casas campo (HAU, 2005, p. 33).

John e Gerhard Albers desenvolveram um "carregador de vento" de 6V em 1927 com o nome de *Alber's Propellers Co*. Em 1934, eles formaram a *Wincharger Corporation* (WINCHARGER, 2015). Seu aerogerador de duas pás foi bem-sucedido, Figura 12. Ele fornecia corrente contínua, originalmente disponíveis em tamanhos de 200 a 1200 W. O modelo de 200 W tinha um rotor de apenas 1,8 m de diâmetro, foi muito menos dispendioso do que a máquina de Jacobs, e foi vendido em números muito grandes para alimentar rádios e algumas luzes em fazendas e ranchos (SPERA, 2009, p. 38).

Figura 12. Aerogerador da Wincharger.



Fonte: (WINCHARGER, 2015).

A Wincharger:

- Produziu aproximadamente 75% dos estimados 1 milhão de aerogeradores fabricados antes de 1950;
- Detém o recorde de volume de produção e maior período de produção contínua de aerogeradores, 1927-1982 (55 anos);
- Fez mais de 20 modelos, incluindo 2, 6, 12, 32 e 110 V e 100 W a 1800 W;
- Utilizavam pás de madeira produzidas por Douglas Fir. O alumínio foi usado mais tarde nos modelos de quatro pás;
- Fabricavam suas próprias torres e baterias.

Assim, o típico aerogerador da década de 1930 tinha evoluído a partir das máquinas pioneiras de Brush e LaCour em um aerogerador de eixo horizontal (AEH) de duas ou três pás com o rotor *upwind* (barlavento) e baixa solidez (razão entre a área projetada pelas pás e a área varrida pelo rotor), usando o mesmo tipo de leme para controle direcional. Seu sistema elétrico era operado a 12 ou 32 V e utilizava baterias de chumbo-ácido para armazenamento da energia. O típico aerogerador da década de 1930 era normalmente operado a uma velocidade variável e possuía suas pás em um ângulo de passo fixo. Alguns modelos, no entanto, incorporavam passo variável como um meio de controle de velocidade excessiva. O aerogerador Jacobs, por exemplo, permitiu cargas centrífugas em um sistema de controle tipo *flyball* (tipo pêndulo). Isso proporcionou um sistema de controle de passo simples, porém eficaz, que embandeiravam as pás com o aumento da velocidade do rotor (SPERA, 2009, p. 40).

No final dos anos 1930, esses aerogeradores eram geralmente confiáveis e duráveis. Eles não tinham o desempenho ou a relação custo-benefício (e muito menos a capacidade de produção de energia em C.A.) para competir como uma fonte de eletricidade. Isso pouco importava em áreas afastadas até que a Lei de Eletrificação Rural de 1937, promulgada como parte do programa do governo Roosevelt para tirar a nação da Grande Depressão (SPERA, 2009, p. 40).

1.2.2.3 Austrália

Contemporâneo dos irmãos Jacobs, um dos primeiros pequenos aerogeradores para produção de energia elétrica está mostrado na Figura 13. Foi construído pelos irmãos ingleses de Wisbech na Inglaterra, e projetado por Edward Burne. Em circunstâncias que não foram bem evidenciadas, um dos moinhos de vento de Burne foi instalado em uma fazenda de propriedade de Russell Grimwade perto de Frankston, Victoria, Austrália, em 1924 (WOOD, 2011, p. v).

Figura 13. O pequeno aerogerador de Burne no rancho Russel Grimwade.

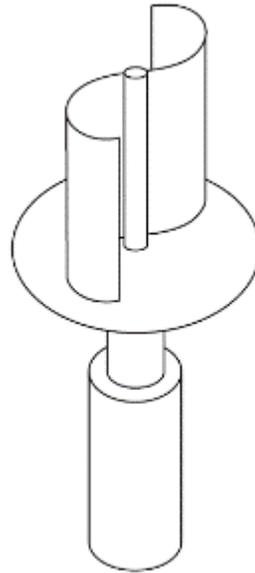


Fonte: (WOOD, 2011, p. vi).

1.2.2.4 Finlândia

Um tipo inovador de rotor de aerogerador, o rotor Savonius, nomeado devido ao seu inventor, o engenheiro finlandês Sigurd Johannes Savonius, foi testado pela primeira vez em 1925 (SAVONIUS, 1931; BACH, 1931 *apud* SPERA, 2009, p. 38), Figura 14. O interesse do inventor foi despertado observando o rotor do navio Flettner com a suas velas grandes e cilíndricas girantes (SPERA, 2009, p. 38).

Figura 14. Esquema de um Rotor Savonius.



Fonte: (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 153).

De acordo com o inventor, o rotor Savonius alcançou alguma popularidade na Finlândia, mas não prosperou comercialmente como um meio para acionar um gerador elétrico. Ele foi uma moda na década de 1960 e 70, em grande parte porque sua concepção e construção eram muito simples. Poderia ser feito de um tambor de óleo e um pedaço de tubo, o que de fato foi realizado por amadores entusiastas em muitos lugares ao redor do mundo. Suas outras vantagens foram alto torque de partida e a capacidade de aceitar vento de qualquer direção; seus inconvenientes foram baixa velocidade e peso elevado. O rotor Savonius tem aparecido em formas mais sofisticadas em eixo vertical, às vezes com três pás para nivelar a variação de torque durante cada revolução do rotor. Seu coeficiente de potência gera alguma dúvida, mas parece que o valor máximo mais confiável é entre 0,18 e 0,23 (SPERA, 2009, p.38; HAU, 2005, p. 71).

1.2.2.5 Canadá

Um outro projeto de rotor inovador introduzido na década de 1930 era um tipo de aerogerador de eixo vertical inventado por Georges Jean Marie Darrieus. O rotor Darrieus tem duas ou três pás curvas fixadas na parte superior e inferior por uma coluna central, aceitando o vento de todas as direções. A forma curva das pás do aerogerador Darrieus que se aproxima de um membro

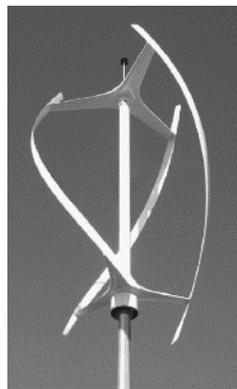
perfeitamente flexível, e sob a ação de forças centrípetas, as tensões de flexão seriam poucas ou nenhuma ao longo do seu comprimento. Esta curva teórica é chamada de *troposkein*, do grego para "*turning rope*". Após a sua aparência inicial, o aerogerador Darrieus era geralmente negligenciada até que foi reinventada no Canadá no início de 1970 e desenvolvido naquele país e nos Estados Unidos (SPERA, 2009, p. 39; HAU, 2005, p. 62).

Na década de 1980 extensos programas de pesquisa e desenvolvimento em aerogeradores de eixo vertical Darrieus realizados em laboratórios do governo e na indústria. Avanços significativos foram realizados no desenvolvimento de ferramentas de projeto, componentes e sistemas. A maioria dos primeiros rotores Darrieus comerciais eram desenvolvidos no *Sandia National Laboratories* e no *National Research Council of Canada* (SPERA, 2009, p. 234).

O *Sandia* juntamente com o *Department of Energy* (DOE) testaram uma máquina de 625 kW em 1987. Vários fabricantes desenvolveram aproximadamente 650 aerogeradores desse tipo. Porém, devido à contração do mercado na década de 1990, essa produção foi descontinuada (SPERA, 2009, p. 234).

Atualmente (2016), os aerogeradores Darrieus (Figura 15) estão comercialmente disponíveis, principalmente em áreas urbanas e em topos de edifícios. Geralmente têm até 20 kW e possuem um bom desempenho em condições de vento com mudanças de direção e baixa velocidade (SPERA, 2009, p. 235).

Figura 15. Rotor Darrieus da Quietrevolution QR5 6-kW.



Fonte: (SPERA, 2009, p. 235).

1.2.2.6 Inglaterra

Na Inglaterra, a empresa *John Brown* instalou um aerogerador experimental nas Ilhas *Orkney* em 1950 ao norte da *Scotland Hydroelectric Board* (Figura 16). Entretanto, o aerogerador de três pás com um diâmetro de 15 m e uma potência nominal de 100 kW não foi um sucesso e sua operação interligada com a estação de energia diesel nas Ilhas *Orkney* durou apenas alguns meses. A principal razão para o fracasso foi provavelmente o projeto complexo do rotor, com pás ligadas ao eixo via articulações de *flap* e de arrasto (HAU, 2006, p. 36).

Figura 16. Aerogerador de John Brow.



Fonte: (HAU, 2006, p. 37).

Quase que ao mesmo tempo (1956), a empresa *Enfield Cable* também construiu na Inglaterra um aerogerador de 100 kW com 24,4 m de diâmetro, com base nos planos do engenheiro francês Andreau (Figura 17). O aerogerador Andreau-Enfield é baseada em um conceito técnico, que tem mantido a sua singularidade até hoje (BONNEFILLE, 1975 *apud* HAU, 2005, p. 36).

Figura 17. Aerogerador Andreau-Enfield.



Fonte: (HAU, 2005, p. 38).

1.2.2.7 França

Em paralelo com o projeto de Andreau, Louis Vadot desenvolveu dois aerogeradores, que foram criadas em *Saint-R'emy-de-Provence*, França, na costa do *English Channel*. Vadot começou com um aerogerador pequeno com um diâmetro de rotor de 21,1 m e uma potência nominal de 132 kW, Figura 18. No entanto, o aerogerador foi desmantelado em 1964, pois, a EdF (*Electricité de France*) já não estava mais interessada na utilização da energia eólica (HAU, 2005, p. 38).

Figura 18. Aerogerador de Vatot.



Fonte: (HAU, 2005, p. 40).

1.2.2.8 Alemanha

Na Alemanha, a *Studiengesellschaft Windkraft e.V.* (Sociedade para o Estudo da Energia Eólica) foi fundada em 1949. Ulrich Hütter, que se destacou com seus artigos na teoria de aerogeradores em 1942, teve um papel de liderança neste processo. Em nome do Grupo *Allgaier Werkzeugbau GmbH* em *Uhingen*, Alemanha, Hütter projetou inicialmente um aerogerador pequeno, com um diâmetro de rotor de 10 m e 8 a 10 kW de potência nominal. Cerca de 90 unidades deste aerogerador foram construídas e provou ser bastante satisfatória. Em 1958, Hütter começou a desenvolver um aerogerador maior, a W-34 (Figura 19), que tinha um diâmetro de 34 metros e uma potência nominal de 100 kW (HAU, 2005, p. 40).

Figura 19. Aerogerador W-34 de Hütter.



Fonte: (HAU, 2005, p. 42).

1.2.2.9 Rússia

A ex-URSS, como os Estados Unidos, tem áreas enormes sob cultivo que precisam de energia elétrica. Assim, os russos, também, desenvolveram moinhos com múltiplas pás de um tipo

simples, com alto torque, rotores de baixa velocidade adequados à elevação de água com bombas de pistão. Tem-se algumas traduções [por exemplo, Fateev (também escrito Fateyev) 1959] que permitem uma visão geral e como que em muitos aspectos são semelhantes ao do Ocidente. De acordo com Fateev, a pesquisa com aerogeradores tinha estado sob o patrocínio do governo na URSS desde o fim da Primeira Guerra Mundial e eram realizados experimentos em túnel de vento e o estabelecimento de fundamentos experimentais para testar sistemas completos para a eficiência operacional e resistência mecânica. Modernas, aerogeradores de alta velocidade com duas ou três pás foram feitas em vários tamanhos, até 20 m de diâmetro, gerando até 35 kW. Fateev salienta que a longo prazo, a utilização bem-sucedida só seria possível com uma boa manutenção, e que isso não estava sempre disponível na Rússia (ou em outro lugar, pode-se acrescentar) (SPERA, 2009, p. 40).

1.2.2.10 Brasil

Até o momento, não houve progresso na pesquisa em relação à quando se chegou a energia eólica no Brasil. Sabe-se que a tecnologia de cata-ventos multipás foi implantada no país há muito tempo para bombeamento de água. Este tipo de tecnologia foi amplamente utilizado, principalmente em áreas com escassez de água e energia elétrica, o que pode ser ratificado no projeto da Sudene/UFPE intitulado “Desenvolvimento de Conjuntos Cata-vento/Sistemas de Bombeamento” nos anos de 1982 e 83.

Entretanto, o primeiro aerogerador para geração de eletricidade foi implantado em Fernando de Noronha - PE no ano de 1992 pelo Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE)/UFPE, atual Centro de Energias Renováveis (CER) sediado na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Tratava-se de uma máquina com 75 kW de potência, como mostra a Figura 20 (SILVA, 2003, p. 4).

Figura 20. Primeiro aerogerador instalado no Brasil.



Fonte: (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2005).

Após esse período, houve uma grande expansão dos aerogeradores de grande porte no país. As máquinas de pequeno porte para geração de eletricidade começaram a ser evidenciadas a partir de 2001, com a empresa nacional Enersud no Rio de Janeiro seguida das empresas Eletrovento e Canoas Eólica, ambas no estado de São Paulo. A Tabela 3 resume as informações de seus aerogeradores.

Tabela 3. Aerogeradores de fabricação nacional.

Fabricante	Potências (kW)	Eixo	Nº de pás
Enersud	0,25/0,35/1/ <u>1,5</u> /6	H/ <u>V</u>	3
Canoas	5/24	H	3
Eletrovento	0,5/1/2/3/5/10/20/30/50/100	H	3

Fonte: Elaborada pelo autor.

1.2.3 Ressurgimento da energia eólica

O programa de aerogeradores do Professor Hütter na Alemanha terminou pelas mesmas razões que acabou em outros países: a energia a partir de combustíveis fósseis e nuclear eram baratas, e a procura por fontes alternativas de energia estava escassa. No final da década de 1960, havia pouca documentação útil e quase não existia dados experimentais dessas várias décadas de

atividades em energia eólica em todo o mundo. Para todos os grandes avanços nesse campo desde o final do século XIX, os projetistas de máquinas eólicas nos anos 70 tinham pouca informação sólida sobre como se construir um aerogerador (SPERA, 2009, p. 112).

Porém, o ressurgimento da energia eólica pode ser considerado como sendo no final de 1960. O livro *“Silent Spring”* (CARSON, 1962 *apud* MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 17) fez muitas pessoas conscientes das consequências ambientais do desenvolvimento industrial. *“Limits to Growth”* (MEADOWS *et al.*, 1972 *apud* MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 17), seguiu no mesmo sentido, argumentando que o crescimento irrestrito levaria inevitavelmente ao desastre ou mudança. Entre os culpados identificados foram os combustíveis fósseis. Os potenciais perigos da energia nuclear também se tornaram mais público neste momento. Discussões desses temas formaram o pano de fundo para um movimento ambiental que começou a defender as fontes de energia mais limpas (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 17).

Nos Estados Unidos, apesar da crescente preocupação com as questões ambientais, não houve novidades no desenvolvimento da energia eólica até a crise do petróleo em meados dos anos 1970. Sob a administração de Carter, um novo esforço foi iniciado para desenvolver fontes alternativas de energia, uma das quais era a energia eólica. O Departamento de Energia dos EUA (do inglês, *Department of Energy – DOE*) patrocinou uma série de projetos para fomentar o desenvolvimento da tecnologia. A maior parte dos recursos foram destinados a máquinas de grande porte. Estas máquinas variaram de 100 kW (38 m de diâmetro) NASA MOD-0 a 3,2 MW Boeing MOD-5B com o seu diâmetro de 98 m. Dados muito interessantes foram gerados, mas nenhuma dos grandes aerogeradores levou a projetos comerciais (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 17).

O DOE também apoiou o desenvolvimento de alguns pequenos aerogeradores eólicas e construiu uma instalação de ensaios para as pequenas máquinas em *Rocky Flats*, Colorado. Uma série de pequenos fabricantes de aerogeradores também começou a surgir, mas não havia muita atividade até final de 1970 (DODGE, 2009 *apud* MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 17-18). As grandes oportunidades ocorreram como resultado de mudanças na estrutura regulatória

e da concessão de incentivos. O governo federal dos Estados Unidos, através da Lei de Utilidade Pública de 1978, exigiu que as concessionárias: (1) permitiriam que os aerogeradores se conectassem com a rede e (2) pagassem os "custos adicionais" para cada kWh gerado e despachado na rede (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 17-18). Assim, começou um novo cenário para os APPs.

1.2.4 Cenário atual dos APPs

Atualmente (2017), os aerogeradores de pequeno porte são, na sua maioria, constituídos de rotores de eixo horizontal a barlavento com no mínimo três pás (ANEXO C). Seu gerador possui ímãs permanentes e seu mecanismo de guinada (*yaw*) é através lemes controladores de direção. Há também os rotores a sotavento que, em geral, não possuem leme direcionador, ficando esse mecanismo de giro por conta da própria nacelle. Em paralelo, existe também os aerogeradores de eixo vertical.

Segundo o *website All Small Wind Turbines*, existem mais de 400 modelos de pequenos aerogeradores, incluindo-se os de eixos horizontal e vertical, e mais de 190 fabricantes em todo o mundo (ALL SMALL WIND TURBINES, 2015).

Com o crescente mercado de aerogeradores de pequeno porte, fez-se necessário avaliar as características técnicas e de qualidade dessas máquinas para assegurar ao comprador sua boa funcionalidade e garantir o que diz o fabricante. No **Capítulo 2** será evidenciado um histórico sobre o processo evolutivo das áreas para certificação de aerogeradores.

O setor de pequenos aerogeradores tem atraído cada vez mais o interesse do público nos últimos anos. Na Dinamarca, por exemplo, foi criada a Associação de Pequenos Aerogeradores (*Small Wind Turbine Association*) em 2009 para promover pequenos aerogeradores de até 25 kW, a fim de fornecer energia para casas particulares e fazendas (EUROSOLAR, 2011).

Essa Associação desempenhou um papel de liderança no lançamento de pequenos aerogeradores no mercado em nível político e público. Mais de 300 aerogeradores foram instalados na Dinamarca desde então. Cerca de 20 fabricantes e fornecedores trabalham neste setor. As tarefas

desta Associação incluem a conscientização do público, a introdução das normas técnicas e da formação de redes com equipamentos públicos, bem como autoridades de planejamento e aprovação. Além disso, a Associação apoiou a criação de uma estação de ensaios eólicos (EUROSOLAR, 2011).

Pequenos aerogeradores permitem que os cidadãos possam gerar sua própria energia e também aumentar o valor líquido regional. Eles são um fator importante para a conversão do sistema de energia a partir de recursos centralizados e fósseis para fontes descentralizadas e renováveis de energia (EUROSOLAR, 2011). São também um complemento aos sistemas fotovoltaicos e outras tecnologias de energia renovável. A Associação realiza propaganda em nome dos fabricantes e fornecedores e exige políticas que criem incentivos confiáveis para promover esses aerogeradores, a fim de incentivar os muitos investidores privados (EUROSOLAR, 2011).

A *Alliance for Rural Electrification* (ARE) elaborou um relatório sobre o potencial de pequenos e médios aerogeradores em países em desenvolvimento. Nele foi mostrado o fato de que aerogeradores desses portes são adequados para instalações isoladas. APPs também podem ser facilmente combinados com sistemas híbridos (solar, por exemplo) criando mais possibilidades. Enquanto que o custo das fontes convencionais de energia tende a subir, o valor dos APPs tende a decrescer, mostrando a atratividade dessa tecnologia (ALLIANCE FOR RURAL ELECTRIFICATION, 2012).

Ainda, a ARE (2012) aponta os motivos pelos quais deve-se escolher pequenos e médios aerogeradores:

- Melhor custo-benefício e retorno de investimento mais rápido (em condições de vento favoráveis);
- Fácil integração com sistemas híbridos;
- É a solução mais plausível não apenas para gerar energia para pequenos negócios ou residências, mas também aumenta a sinergia em setores como os da telecomunicação;
- É uma fonte menos sujeita a roubos e vandalismo.

O relatório ainda aponta o que deve ser feito para acelerar o desenvolvimento dessa tecnologia:

- Difundir seu conhecimento;

- Encorajar comunidades locais e pequenos negócios a utilizarem essa fonte de energia;
- Estudos de viabilidade e avaliação de dados eólicos;
- Integrar, estabelecer e controlar a qualidade de normas e da certificação;
- Encorajar o desenvolvimento de parcerias entre empresas e academia para garantir uma instalação adequada, operação e manutenção e assim gerar empregos locais;
- Ter suporte financeiro, de órgãos de fomento ou sobre a produção, pode ter impacto significativo para acelerar o desenvolvimento de APPs.

O relatório mostra também quatro estudos de caso de sucesso na Indonésia, China, Namíbia e Madagascar e pode ser lido na íntegra em ALLIANCE FOR RURAL ELECTRIFICATION (2012).

Os relatórios da IRENA (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2016a; INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2016b) também apontam que APPs são a melhor opção para sistemas isolados e geram desenvolvimento local com suas aplicações.

As mini redes são uma solução para eletrificação de áreas isoladas e consiste da junção de uma ou mais tecnologias renováveis ou não. O desenvolvimento da indústria de mini redes utilizando APPs é ainda incipiente e seu valor será diminuído à medida que sejam produzidos em larga escala juntamente com garantia da qualidade e bom funcionamento através de certificação. Assim, essas mini redes se tornarão mais competitivas com a geração diesel em países em desenvolvimento (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2016a, p. 21; INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2016b, p. 45).

No Brasil, há ao menos três fabricantes de pequenos aerogeradores. Para desenvolver a utilização desse tipo de tecnologia, foi elaborada a Resolução Normativa (REN) nº 482/2012 da ANEEL para estimular o uso da micro e minigeração no país. Recentemente (2015) essa REN passou por uma revisão e foi substituída pela REN 687/2015. Uma discussão sobre a REN é apresentada no

Capítulo 4.

1.3 JUSTIFICATIVAS

Os aerogeradores instalados no Brasil possuem características incompatíveis, em sua maioria, com as condições climáticas locais, principalmente na região Nordeste onde as características de vento são diferenciadas. Isso se referindo a aerogeradores de grande porte. Não tão distante, os

APPs também seguem essa linha, mesmo os fabricados no Brasil, atingindo sua potência nominal em velocidades elevadas (10-12 m/s) e ainda com o agravante de essas máquinas serem instaladas, geralmente, a baixas alturas, o que dificulta atingir altas velocidades de vento. É importante observar que no Nordeste do país os ventos são praticamente constantes em direção e magnitude, o que faz repensar nos conceitos das máquinas existentes e em seus projetos, que em sua maioria são europeus onde as características de vento diferem das do Nordeste do Brasil.

Desenvolvendo-se projetos para a realidade do vento dessa região, a tendência é de se diminuir o custo final da energia ao consumidor e aumentar a produção de energia para baixas velocidades. Isso requer investimentos em projetos e infraestrutura.

Não obstante, o Brasil vem passando por momentos de marcos na energia eólica em geral. Especificamente nas máquinas de pequeno porte, vem-se envidando esforços para o crescimento dessa tecnologia no país. Isso é corroborado pela Resolução Normativa (REN) 482/2012 da ANEEL que veio a ser discutida no *Workshop* realizado pelo CEPEL no mesmo ano. Em 2015, uma versão atualizada daquela foi lançada: a REN 687/2015.

A necessidade de certificação de produtos em geral é uma forma de garantir que o produto esteja adequado para utilização e dentro dos padrões de qualidade e segurança. Com aerogeradores não é diferente. O problema é que no Brasil ainda não há Organismo Certificador para essa tecnologia. Se um fabricante quer certificar o seu aerogerador, não há a quem recorrer, pois, não existe laboratórios para certificação em condições reais de suas máquinas. Não obstante, há também a necessidade de desenvolvimento de tecnologia. Porém, o avanço tecnológico é barrado por falta de áreas de ensaios e testes no país. É importante salientar que onde há instalação de aerogeradores de pequeno porte, há também desenvolvimentos tecnológico e social, como mostra os relatórios da *Alliance For Rural Electrification (ARE)* e *International Renewable Energy Agency (IRENA)*.

O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) por sua vez, emite um selo para o aerogerador descrito na sua Portaria nº 168/2015, porém, só solicita os ensaios de

desempenho de potência e acústico onde na verdade deveria, além desses, solicitar os de duração e segurança e função que são obrigatórios segundo as normas IEC.

Esta tese mostra que há diversas áreas de ensaios no mundo e que há essa preocupação com a qualidade e segurança dos aerogeradores. Nos EUA por exemplo, houve uma procura por parte dos fabricantes para se ter Órgãos que ensaiasse e certificasse seus equipamentos de modo a terem maior credibilidade no mercado (SMALL WIND CERTIFICATION COUNCIL, 2016), além de assegurar qualidade e segurança para o consumidor. Em seu propósito principal, esta tese apresenta uma metodologia pioneira para identificar potencialmente áreas de ensaios no Brasil, mas pode ser aplicada para qualquer localidade. Desta forma, este trabalho ajuda a selecionar potencialmente o melhor local para a realização dos ensaios dessas máquinas, sejam elas de grande ou pequeno porte, sem que haja medições locais, pois varre todas as possibilidades de características de vento intrínsecos ao parâmetro de Weibull k . Não obstante, auxiliará no processo de normatização nacional.

É importante observar também que não foram encontrados registros de como foram selecionadas as áreas de ensaios/testes existentes. Provavelmente por meios empíricos/observacionais de áreas que já se utilizava para algum fim. Isso também motivou o desenvolvimento dessa metodologia.

1.4 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados os objetivos geral e específicos.

1.4.1 Objetivo Geral

Apresentar e validar uma metodologia para identificação/seleção de potenciais áreas de ensaios e testes para certificação e desenvolvimento de pequenos aerogeradores.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Levantar informações de áreas de ensaios/testes e organismos certificadores de aerogeradores de pequeno porte no mundo;

- Relatar a experiência obtida com o comissionamento do Projeto PILACAS;
- Aplicar a metodologia desenvolvida nesta tese;
- Elaborar um documento que poderá contribuir para início do processo de normatização para certificação nacional de pequenos aerogeradores.

1.5 ESTRUTURAÇÃO DA TESE

Esta tese está estruturada em oito capítulos como segue: No **Capítulo 1** é apresentado um histórico sobre APPs desde a sua concepção até os dias atuais (2017). O **Capítulo 2** evidencia a evolução no processo de certificação, desde como surgiram os processos de certificação e normatização e as entidades certificadoras no mundo. O **Capítulo 3** apresenta o Projeto PILACAS, cujos objetivos foram a formação de recurso humano, comissionamento, operação e manutenção da área de ensaios para APPs. No **Capítulo 4** é analisado o mercado de APPs no mundo e no Brasil e como se pode aprender com as políticas de incentivo aplicadas em outros países para utilização no Brasil. O **Capítulo 5** apresenta uma Metodologia de caráter inovativo para seleção de áreas de ensaios de aerogeradores. No **Capítulo 6** essa metodologia é aplicada. O **Capítulo 7** traz o arremate final desta tese.

1.6 RESUMO DO CAPÍTULO 1

Este **Capítulo 1** evidenciou a evolução dos aerogeradores, da sua concepção até o cenário atual (2017), tanto dos pontos de vista tecnológico, geométrico, de potência e de utilização quanto da geração de energia elétrica. Limitou-se apenas ao seu objetivo que são aerogeradores de pequeno porte.

O **Capítulo 1** reuniu várias informações que estavam contidas, em sua maioria, em alguns poucos livros que mostram o interesse no desenvolvimento dessa tecnologia pela humanidade. Não obstante, informações de sites específicos e artigos científicos. Vale lembrar que as informações sobre este tema são escassas e o autor procurou reunir as informações encontradas/disponíveis em um só documento de modo que ficasse mais clara a evolução desses aerogeradores e célere

para pesquisas futuras. Neste capítulo, o autor também **propõe definições para aerogeradores de pequeno porte**, bem como a utilização do acrônimo APP.

2 EVOLUÇÃO DAS ÁREAS DE ENSAIOS PARA CERTIFICAÇÃO

Nesta seção serão abordadas as áreas de ensaios em todo o mundo, seu histórico e contribuições/funções, bem como as entidades certificadoras. Além disso, propõe uma diferenciação dos termos ensaio e teste, sendo o primeiro utilizado para certificação e o segundo para desenvolvimento da tecnologia como será visto adiante.

2.1 CERTIFICAÇÃO

Um elemento-chave para assegurar que os potenciais instaladores de sistemas eólicos garantam seus investimentos é a certificação (APÊNDICE A). Os fabricantes de aerogeradores adquirem a certificação através de agências acreditadas para demonstrar que suas máquinas estejam em conformidade com as normas internacionalmente reconhecidas em segurança, qualidade e integridade (JONKMAN, VAN DAM e FORSYTH, 2003, p. 1).

Durante o início da década de 1970 uma série de pequenas empresas norte-americanas, reconhecendo o potencial da energia eólica, suas limitações e o custo dos poucos aerogeradores existentes na época como as *Dunlite* (Austrália), *Aerowatt* (França) e *Elektro* (Suíça) que estavam sendo importadas, começaram a desenvolver pequenos aerogeradores entre 1 e 10 kW. Várias atividades de apoio foram iniciadas pelo governo dos EUA, como uma consequência dos primeiros estudos sobre a utilização da energia eólica para pequenas aplicações rurais ou em áreas remotas (SPERA, 2009, p. 118).

Com o intuito de avaliar os aerogeradores que estavam sendo produzidos, para assegurar seu bom desempenho e qualidade, foram criadas áreas de ensaios não apenas nos EUA, mas também na Europa. Observe que o texto disserta mais sobre àquele país, pois, foi o pioneiro e possui maior quantidade de material disponível.

Apesar de toda a longa história da energia eólica, houve pouco detalhamento a respeito dessa tecnologia, medidas de desempenho ou outros dados de engenharia disponíveis. Havia poucas ferramentas de projeto, os modelos analíticos eram validados com dados insignificantes e a maioria das informações não tinha confiabilidade. Assim, os ensaios de máquinas disponíveis

tornaram-se uma prioridade, tanto nos EUA como no exterior (SPERA, 2009, p. 118). Nas próximas sessões serão apresentados os principais centros de ensaios e testes de APPs.

2.2 ENSAIO E TESTE

Antes de começar este capítulo será abordada uma discussão sobre ensaios e testes. Em uma primeira tentativa de se diferenciar esses termos, Alonço (2002) escreveu um texto explicativo de forma pertinente. O texto foi baseado em máquinas agrícolas, porém se pode abranger para qualquer tipo de equipamento:

O termo teste pode ser aplicado a máquinas agrícolas quando designar, exclusivamente, simples verificação do funcionamento objetivando a revisão de ajustagens e verificação expedita das respostas a comandos ou a variações de regulagens (ALONÇO, 2002).

O ensaio de máquinas agrícolas visa o levantamento de informações quantitativas, através das quais suas características de desempenho possam ser julgadas. O ensaio é executado segundo uma metodologia pré-estabelecida e devidamente padronizada, denominada norma de ensaio (ALONÇO, 2002).

Ainda assim, Alonço (2002) diferencia experimentação de pesquisa, como segue:

A experimentação, trata da verificação e estudo, através de experiências científicas, dos fenômenos físicos e biológicos relativos ao comportamento das máquinas agrícolas. A experimentação difere do ensaio por não se vincular diretamente a procedimentos padronizados ou normas e, por incluir no relato dos resultados obtidos, uma revisão de literatura, uma análise e discussão dos dados obtidos e também as conclusões a que se chegou (ALONÇO, 2002).

A pesquisa é ampla, livre e geral, visando mais a formação de conceitos ou formulação de princípios, do que a informação sobre comportamento ou desempenho. A pesquisa forma a base científica onde encontram apoio os procedimentos das normas de ensaio, os requisitos a serem satisfeitos no projeto de máquinas e a explicação para os fenômenos detectados através da experimentação (ALONÇO, 2002).

O novo dicionário de termos técnicos (FÜRSTENAU, 1999) não diferencia ensaios de testes. Já o dicionário Aurélio® (FERREIRA, 1999) dá as seguintes definições:

- Ensaio
 1. Prova ou experiência com o fim de verificar o desempenho de alguma coisa;
 2. Exame, análise, apreciação;
 3. Tentativa, experiência.

- Teste
 1. Exame, verificação ou prova para determinar a qualidade, a natureza ou o comportamento de alguma coisa, ou de um sistema sob certas condições;
 2. Método, processo, procedimento ou meios utilizados para tal exame, verificação ou prova.

Porém, esta tese propõe uma definição para diferenciar esses dois termos. Seguindo a ideia de Alonço (2002), juntamente com as definições dos dicionários mencionados, propõe-se:

- ✓ **Ensaio:** o ensaio é executado segundo uma metodologia pré-estabelecida e devidamente padronizada, denominada norma, objetivando a certificação de equipamento ou componente.

- ✓ **Teste:** trata-se de estudo e desenvolvimento, através de experimentos científicos, físicos ou analíticos, visando a/o verificação/aprimoramento de equipamento ou componente, sem seguir obrigatoriamente uma metodologia pré-estabelecida.

2.3 ESTAÇÃO DE ENSAIOS DE ROCKY FLATS

Ao *Rocky Flats Plant* perto de Golden, Colorado, operado pela *Rockwell International Inc.* para a *Energy Research and Development Administration (ERDA)*, que se tornou o *Department of Energy (DOE)*, foi dada a responsabilidade para o desenvolvimento e ensaios de pequenos aerogeradores. A estação de ensaios consistiu em um conjunto de 32 postos, cada um capaz de dar suporte, manutenção e coletar dados de um aerogerador de pequeno porte. Durante os anos de 1976 a 1981, quando a maior parte dos ensaios foram realizados, 54 diferentes aerogeradores entre 1 e 50 kW foram ensaiados/testados (Figura 21). O desempenho e a confiabilidade desses

aerogeradores comerciais e experimentais de pequena escala foram avaliados (SPERA, 2009, p. 118).

Figura 21. A estação de ensaios de *Rocky Flats*, perto de Boulder, Colorado.



Fonte: (SPERA, 2009, p. 119).

As máquinas desenvolvidas pela indústria privada poderiam ser ensaiadas em *Rocky Flats* sob dois procedimentos diferentes: o primeiro, um aerogerador poderia ser ensaiado às custas do governo, porém os resultados seriam de informação pública. Em segundo lugar, o fabricante poderia pagar pelos ensaios, caso em que os resultados permaneceriam proprietários (SPERA, 2009, p. 118).

Uma consequência importante dos ensaios em *Rocky Flats* (bem como a *Sandia National Laboratories* e *NASA Lewis Research Center*), foi o desenvolvimento de métodos de ensaio normatizados para determinar curvas de potência. Esta característica de desempenho é uma das mais difíceis de medir por causa da variabilidade do vento. Antes de 1979, a maioria das curvas de desempenho de energia para aerogeradores comerciais geralmente não eram reproduzíveis nem comparáveis dentro de limites aceitáveis de incerteza (SPERA, 2009, p. 118).

A padronização de termos e metodologias trouxeram grandes melhorias para estimativas da produção anual de energia através das curvas de potência dos fabricantes. Técnicas de análise de dados desenvolvidos em *Rocky Flats* e Sandia (como o método dos *bins*) foram posteriormente incluídos nas normas voluntárias adotadas pelas *International Energy Agency* (IEA), a *American Wind Energy Association* (AWEA), e a *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) (SPERA, 2009, p. 118).

Dificuldades em se determinar uma curva de potência, devido à variabilidade do vento e a necessidade de validar modelos analíticos, levou a ensaios de desempenho suplementares nas proximidades de *High-Speed Rail Test Facility* operado pelo Departamento de Transportes. Aerogeradores de pequeno porte foram colocados em uma torre montada em um vagão plataforma e empurrados por uma locomotiva diesel a velocidades que cobrem toda a gama de velocidades de vento de operação dos aerogeradores. O controle da velocidade relativa entre o aerogerador e o ar permitiu uma rápida validação de curvas de potência e as técnicas de análise forma desenvolvidas para testes no local (SPERA, 2009, p. 119).

Pouco depois do início dos ensaios de aerogeradores em *Rocky Flats*, foram emitidas uma série de solicitações para o desenvolvimento de novos sistemas de pequena escala, com o apoio do governo (HEALY e DODGE, 1981 apud SPERA, 2009, p.120).

A primeira série de projetos de desenvolvimento foi iniciada em 1978 e incluiu três níveis de potência nominal: 1 kW a 2 kW, para sistemas extremamente confiáveis para uso remoto; 8 kW, para usos em residências rurais e outros; e 40 kW, para irrigação e outras aplicações agrícolas (SPERA, 2009, p. 120).

Uma segunda série desses projetos de desenvolvimento aconteceu em 1980 com concessões de contratos para as indústrias *Tumac Industries*, *Structural Composites Industries* (SCI), e a *North Wind Power Company* para protótipos de 4 kW. Esse tipo de aerogerador seria aplicado em residências remotas, seja em sistema isolado ou conectado à rede elétrica. A SCI projetou um aerogerador de eixo horizontal (AEH) com um rotor de 3 pás, a sotavento, enquanto que a *Tumac* desenvolveu um pequeno Darrieus com uma torre engastada sem cabos de sustentação. O último

dos projetos de desenvolvimento de pequenos aerogeradores com o apoio do governo foi para uma aplicação agrícola leve, em fazendas e ranchos. Isso resultou em prêmios para as empresas ENERTECH e UTRC, ambas com rotores de eixo horizontal e a sotavento (SPERA, 2009, p. 122).

A pesquisa experimental em *Rocky Flats* tinha equipamentos como dinamômetros, medidores de vibração e testes elétricos para APPs, bem como a validação de modelos computacionais para a predição de desempenho de potência e cargas. No USDA, a pesquisa relacionada ao acoplamento entre o cata-vento e as bombas, para o bombeamento de poços rasos e profundos, foi realizada visando otimizar o rendimento do sistema (SPERA, 2009, p. 124).

2.4 ESTAÇÃO DE ENSAIOS DO DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA)

O Departamento de Agricultura dos EUA (USDA - *Department of Agriculture*) também ensaiou ou uma variedade de APPs em aplicações agrícolas e rurais, incluindo a irrigação, colheita seca, sistemas híbridos e uso da eletricidade em geral (USDA, 1979; CLARK, 1983 apud SPERA, 2009, p. 119). Os ensaios eram realizados principalmente pela unidade *Agricultural Research Service* do USDA perto de *Bushland, Texas*, com alguns em fazendas particulares. Aerogeradores tipo *Darrieus* também foram ensaiados na estação de teste USDA por engenheiros dos *Sandia National Laboratories* em Albuquerque, Novo México, por causa do regime de ventos superior em *Bushland* (SPERA, 2009, p. 119). Em 2011, após décadas de contribuição, o USDA encerrou seu programa com energia eólica (NEWS CHANNEL 10, 2011).

2.5 ESTAÇÃO DE ENSAIOS DO RISØ

Várias estações de ensaios de APPs foram instaladas na Europa durante o final dos anos 1970. A mais notável foi a do *Risø National Laboratory Station for Wind Turbines* no norte da Dinamarca. Além de pesquisa e testes de desenvolvimento, a estação do *Risø* dá suporte para avaliação e certificação de aerogeradores comerciais. Com a certificação fabricantes são elegíveis para vários créditos fiscais e incentivos no país, bem como em outros países da Europa (SPERA, 2009, p. 119).

Enquanto os méritos da certificação do governo podem ser discutidos em relação aos méritos da certificação realizada pela própria indústria juntamente com o funcionamento do mercado, o

programa dinamarquês foi eficaz impedindo que aerogeradores subdesenvolvidos, ou mal desenvolvidos, entrassem no mercado europeu em qualquer quantidade. Isso levou à boa reputação de confiabilidade e desempenho dos aerogeradores dinamarqueses durante o surto altamente competitivo no desenvolvimento de estações de energia eólica nos EUA em meados da década de 1980 (SPERA, 2009, p. 119).

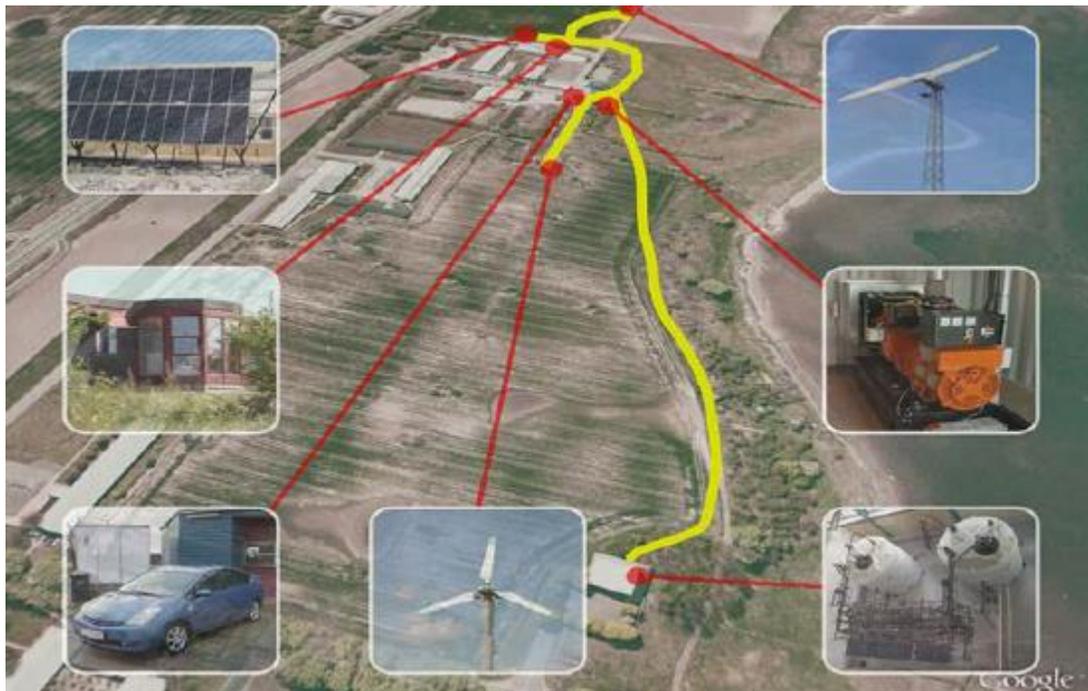
Atualmente (2016), o DTU *Wind Energy* é um departamento voltado para o setor de energia eólica, área na qual é um centro líder global de energia eólica, com competências técnico-científicas de frente internacional e com uma integração única de investigação, de educação e de consulta nos setores público e privado. No departamento estão operando três locais de ensaio/teste de aerogeradores na Dinamarca. Os locais de ensaio/teste estão situados em DTU *Risø Campus (Roskilde)*, *Høvsøre Test Site for Large Wind Turbines (Lemvig)* e *Test Center Østerild (Thisted)* (DTU WIND ENERGY, 2016b).

2.5.1 DTU Risø Campus

O DTU *Risø Campus* dispõe de um laboratório de energia, o *Flexible Intelligent Energy Laboratory (SYSLAB)*, Figura 22, disperso em vários locais no *Risø*. A sua estrutura é formada por uma rede de 400 V onde todas as unidades (geradores, cargas, sistemas de armazenamento) são automatizadas e controláveis remotamente (RISO DTU, 2011).

O SYSLAB é um laboratório para sistemas inteligentes de energia distribuída localizados no DTU *Risø Campus*. A infraestrutura do SYSLAB fornece uma plataforma de pesquisa para testar conceitos e estratégias de controle para sistemas de energia e integrar uma série de componentes de produção e consumo distribuídos (ALTIN, HAN, *et al.*, 2015).

Figura 22. Leiaute geográfico do SYSLAB no Risø campus.



Fonte: (DTU, 2016c)

O SYSLAB consiste de (POWERLAB DK, 2014):

- Rede de 400 V com configuração flexível;
- Unidades de energia renováveis: aerogeradores, painéis fotovoltaicos;
- Conversor *Back to Back*;
- Cargas controláveis;
- Armazenamento de energia em Bateria *Vanadium*;
- Infraestrutura de computação e plataforma de comunicação flexível.

2.5.2 Østerild - National Test Centre for Large Wind Turbines

O centro de ensaio/teste de aerogeradores em Østerild (Figura 23) foi estabelecido a partir de uma lei aprovada pelo governo dinamarquês, em junho de 2010, cujo objetivo era testar novos protótipos. Sua localização geográfica e a disposição de suas instalações permitem a indústria de aerogeradores, em colaboração com DTU e outras instituições de pesquisa, realizar pesquisa,

desenvolvimento, testes e medições nos protótipos de suas máquinas (DTU WIND ENERGY, 2016a).

O centro de ensaios/testes para grandes aerogeradores em *Østerild* é onde estão situadas as sete maiores máquinas do mundo, e há muitas razões para essas estruturas serem erguidas nesse centro, como por exemplo, as condições do terreno e do vento local, favoráveis à execução de ensaios/testes. Os fabricantes também optam por testar os seus aerogeradores *offshore* no centro, devido ao acesso direto às máquinas, já que técnicos muitas vezes têm de substituir componentes e prestar manutenção e assistência durante os ensaios/testes. O acesso no mar é mais complicado e acontece em períodos de tempo mais longos, condições meteorológicas tornam impossível para os técnicos a utilização de guindastes no trabalho. No centro de testes, é possível para os fabricantes completar o ensaio e/ou desenvolvimento de suas máquinas - tipicamente ao longo de um período de 6 a 12 meses (DTU WIND ENERGY, 2015).

Figura 23. Østerild test centre.



Fonte: (DTU WIND ENERGY, 2015)

2.5.3 Centro de testes para grandes aerogeradores em Høvsøre

No final de 1990 o governo dinamarquês decidiu estabelecer um centro de testes para grandes aerogeradores em *Høvsøre* (Figura 24), Dinamarca, na costa oeste de *Jutland*. A fim de estar na vanguarda do setor de energia eólica internacional, estabeleceram instalações de ensaios/testes contemporâneas onde fosse possível realizar medições e ensaiar/testar grandes aerogeradores em velocidades de vento elevadas (DTU WIND ENERGY, 2016c).

Figura 24. *Høvsøre Test Centre*.



Fonte: (NORDISK FOLKECENTER, 2011)

O objetivo principal como um centro de teste nacional para a Dinamarca, foi ensaiar e desenvolver novos aerogeradores e métodos, reunir dados de ensaios/testes realizados e documentar informações relativas à segurança, responsabilidade operacional, relação custo-eficiência e ressonância de ruído acústico. Esta foi a principal razão por trás da motivação do DTU *Wind Energy* para o estabelecimento de um centro de teste nacional (Dinamarca) para grandes máquinas em 2002, garantindo assim relação relevante com a indústria dinamarquesa, fornecendo melhores instalações de: ensaios e testes; meteorologia; e de tecnologia de aerogeradores (DTU WIND ENERGY, 2016c).

Em *Høvsøre*, a planicidade do terreno e as condições de vento permitem uma velocidade quase ininterrupta do vento, proveniente do Mar do Norte, atingindo os aerogeradores em uma

velocidade muito alta comparável à dos ventos em aerogeradores *offshore*. Um mastro de medição se encontra erguido a oeste de cada aerogerador e um mastro meteorológico está situado a sul do posto de teste (DTU WIND ENERGY, 2016c).

Velocidade e direção do vento, temperaturas e pressão atmosférica são medidas em todos os mastros, e alguns destes fornecem medições em diferentes alturas. Em uma altura de 80 metros foi medida uma velocidade média do vento de 9,3 m/s. Todos os dados são continuamente coletados, e a maioria é confrontado com medições realizadas nos aerogeradores (DTU WIND ENERGY, 2016c).

2.6 ESTAÇÃO DE ENSAIOS ATLANTIC WIND TEST SITE (AWTS)

O Instituto de Energia Eólica do Canadá é uma entidade sem fins lucrativos formada em 1981, que avança o desenvolvimento da energia eólica em todo o Canadá por meio de pesquisas, ensaios, inovação e colaboração (WIND ENERGY INSTITUTE OF CANADA, 2016).

Localizado em norte de Cape, na ilha Prince Edward, na costa leste do Canadá, um local ideal para o estudo de vento com 300 graus de visualização do mar, velocidade média do vento de 8,2 m/s, a 50 m, e numerosos eventos de formação de gelo por ano, Figura 25 (WIND ENERGY INSTITUTE OF CANADA, 2016).

Figura 25. Estação de ensaios AWTS em 1999.



Fonte: (ATLANTIC WIND TEST SITE, 1999).

O laboratório dispõe de 10 MW de potência instalada para P&D (cinco aerogeradores DeWind D9.2), uma bancada para armazenamento de dados, torres meteorológicas e uma bancada de ensaios para aerogeradores de pequeno porte, bem como outras instalações. Existem 14 postos de ensaios para APPs e cada um contém sua própria torre meteorológica. A rede elétrica suporta até 600 VAC de carga em uma frequência de 60 Hz. O campo de ensaios tem a capacidade de realizar qualquer ensaio contido na *International Electrotechnical Commission (IEC)*, na *American Wind Energy Association (AWEA)* ou na *RenewableUK Small Wind Turbine Standard*, bem como atender às necessidades em P&D dos fabricantes. Estes, além de extensos conjuntos de dados e expertise de pessoal, proporcionam oportunidades para o governo, empresas do setor público/privado e para a academia destinada à pesquisa, com o intuito de demonstrar, testar e validar tecnologias e conceitos em um ambiente do mundo real (WIND ENERGY INSTITUTE OF CANADA, 2016).

A AWTS foi projetada para executar uma gama de serviços técnicos e científicos para a indústria de energia eólica (ATLANTIC WIND TEST SITE, 1999). Entre eles estão:

- Ensaios de sistemas eólicos para fins comerciais e protótipos para se determinar as características operacionais, de segurança e confiabilidade;
- Desenvolvimento de projetos de colaboração, com a indústria, serviços públicos e governo, especialmente para o Ártico e locais remotos;
- Desenvolvimento e ensaio de equipamentos de monitoramento dos recursos eólicos e metodologias;
- Participação no desenvolvimento de normas nacionais e internacionais para ensaios de desempenho, segurança e conexões elétricas;
- Desenvolvimento e ensaio de sistemas eólico-diesel e outras tecnologias de energia eólica;
- Ensino e fornecimento de informações sobre a tecnologia de energia eólica para o público.

2.7 ESTAÇÃO DE ENSAIOS NATIONAL WIND TECHNOLOGY CENTER (NWTC)

No início da década de 1980 reduções no financiamento de pesquisas em energia eólica deram um fim nas principais atividades de ensaios em *Rocky Flats*. Outras responsabilidades da estação de ensaios foram entregues ao *Solar Energy Research Institute* (SERI), que no começo da década de 1990 tornou-se o *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) do *Department of Energy* (DOE) dos EUA. No entanto, com o ressurgimento do interesse em energia eólica na mesma década, a instalação de *Rocky Flats* foi restaurada e transformada no *National Wind Technology Center* (NWTC) operado pelo NREL. Essa nova instalação fornece, tanto para o governo quanto para a indústria privada, as condições de ensaios em laboratório e de campo necessárias para o desenvolvimento de aerogeradores de pequeno, médio e grande portes (SPERA, 2009, p. 120).

Em 2000, a Whisper H-40 de 900 W foi ensaiada no *National Wind Technology Center*. O relatório de teste de desempenho de potência da Whisper H-40 foi preparado como uma conta de trabalho por uma agência do governo dos EUA. O relatório não seria reproduzido sem a aprovação do NREL que por volta de 2001 ainda não certificava aerogeradores, então a informação contida no relatório estava limitada ao conhecimento e entendimento do NREL e aos padrões da IEC (*International Electrotechnical Commission*) naquele período (FORSYTH e HUSKEY, 2001). O relatório completo da Whisper H-40 (NATIONAL RENEWABLE ENERGY CENTER, 2003).

Uma pesquisa realizada em 2006 conduzida pelo SWCC (*Small Wind Council Certification*) sobre interessados em energia eólica de pequeno porte revelou a necessidade de ensaios de certificação para os aerogeradores (NREL, 2016a). Com 90 participantes, a pesquisa feita com os interessados reforçou o forte interesse e necessidade de certificação de pequenos aerogeradores e seu papel no aumento da confiabilidade dos mesmos. Dos fabricantes que responderam, 89% afirmaram que a certificação seria importante para os seus negócios, com 33% indicando o que seria crítico, essencial ou mesmo necessário (NREL, 2006).

Uma das barreiras para o mercado de energia eólica de pequeno porte tem sido a falta de sistemas de APPs que são ensaiadas e certificadas de forma independente. Para ajudar a indústria a fornecer aos consumidores mais sistemas de APPs certificados, o NREL e o Departamento de

Energia dos EUA (NREL / DOE) lançou o projeto *Independent Testing* em 2007 (NREL, 2013a).

Para aumentar a disponibilidade de ensaios em APPs e compartilhar experiência de campo, o DOE e o NREL iniciaram o projeto *Regional Testing Center (RTC)* em 2009. O projeto terminou no início de 2016. Durante o projeto, o DOE e o NREL subsidiaram ensaios de certificação de dois pequenos aerogeradores em cada um dos 4 RTCs estabelecidos. Além disso, o NREL fornecia assistência técnica durante os ensaios e o processo de análise de dados. O objetivo do projeto seria tornar os RTCs entidades independentes autossustentáveis capazes de fornecer serviços de ensaios de certificação para a indústria de APPs (NREL, 2016a).

Para certificar os APPs, o projeto *Independent Testing* adotou os padrões da *International Electrotechnical Commission (IEC)* realizando os seguintes ensaios:

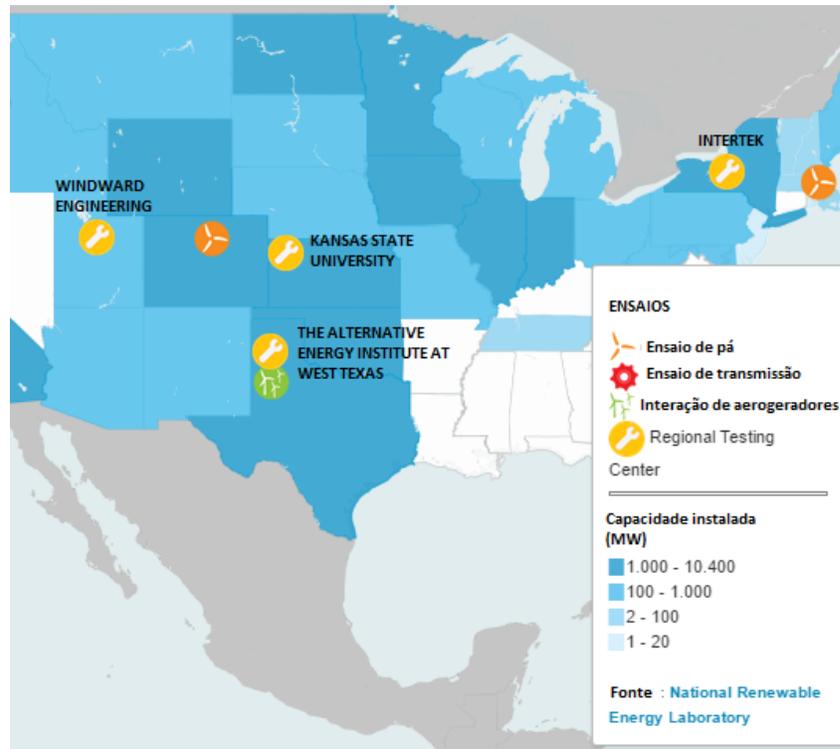
- Duração (IEC 61400-2);
- Desempenho de potência (IEC 61400-12-1);
- Segurança e Função (IEC 61400-2);
- Emissões de ruído acústico (IEC 61400-11);
- Qualidade de energia (IEC 61400-21).

2.7.1 Projeto dos Regional Testing Center (RTC)

O projeto RTC abrangia centros de teste distribuídos pelos EUA totalizando 4 centros de testes parceiros do NREL (Figura 26) (NREL, 2016a):

- *Intertek (Otisco, New York)*;
- *Windward Engineering (Spanish Fork, Utah)*;
- *Universidade do Estado de Kansas / Colby Community College (Colby, Kansas)*.
- *West Texas A&M — Alternative Energy Institute (Canyon, Texas)*.

Figura 26. Distribuição dos RTCs.



Fonte: (NREL, 2016a).

Para certificar os aerogeradores de pequeno porte, os RTCs adotaram os padrões *International Electrotechnical Commission* (IEC) realizando os mesmos testes realizados pelo projeto *Independent Testing* com exceção do teste de qualidade de energia (JIMENEZ, BOWEN, *et al.*, 2010):

- Duração (IEC 61400-2);
- Desempenho de potência (IEC 61400-12-1);
- Segurança e Função (IEC 61400-2);
- Emissões de ruído acústico (IEC 61400-11).

2.7.2 Wind Technology Testing Center (WTTC)

Pertencente ao Centro de Energia Limpa de *Massachusetts* (MassCEC), o WTTC (Figura 27) oferece um conjunto completo de ensaios para fins de certificação de pás de até 90 metros de comprimento. WTTC também oferece os mais recentes ensaios de pá e metodologias de

desenvolvimento de protótipo, para ajudar a indústria eólica a implantar uma nova geração de tecnologias *onshore* e *offshore* (NREL, 2015).

Localizado perto da Autoridade Portuária no porto de Boston, o *Wind Technology Testing Center* é a primeira instalação comercial de testes em grandes pás nos EUA. Com proximidade a recursos eólicos *offshore*, o centro está idealmente localizado para apoiar a indústria eólica *offshore* emergente dos EUA, testando e certificando grandes pás (ENERGY.GOV, 2016). O WTTC também oferece as mais recentes metodologias de testes de pá e desenvolvimento de protótipo com o intuito de ajudar a indústria a implantar a próxima geração de tecnologias *onshore* e *offshore* (MASSACHUSETTS CLEAN ENERGY TECHNOLOGY, 2016).

Figura 27. Laboratório do WTTC.



Fonte: (MASSACHUSETTS CLEAN ENERGY TECHNOLOGY, 2016).

Em um projeto conjunto entre o *Wind Program*, o Centro de Energia Limpa de Massachusetts e o NREL, a instalação do WTTC é credenciada pela *American Association for Laboratory Accreditation* (A2LA) para testar pás de acordo com os padrões da IEC. A instalação é equipada com três bancadas de teste e recursos de testes específicos incluindo testes de material de pá e testes estáticos e de fadiga com referência à IEC 61400-23 (ENERGY.GOV, 2016).

2.7.3 Scaled Wind Farm Technology Facility (SWiFT)

Pertencente aos Laboratórios Nacionais do Departamento de Energia de Sandia, SWiFT (Figura 28) é localizada na *Texas Tech University (TTU)*, em *Lubbock*, e projetada para realizar estudos para melhorar a eficiência de parques eólicos nos campos, incluindo cargas induzidas e perdas de energia por esteira, desenvolvimento de rotores avançados, controle de aerogeradores em parques eólicos, mitigação aero acústica e sistemas de detecção avançados (NREL, 2015).

O resultado de uma parceria de pesquisa pelo *Wind Program* e *Sandia National Laboratories*, com investimentos da *Vestas*, *Texas Tech University (TTU)*, *Grupo NIRE Renewable Energy Solutions*, o local de teste da SWiFT permite o teste e o desenvolvimento eficientes e de baixo custo de tecnologias de energia eólica (ENERGY.GOV, 2016). Em linhas gerais, a SWiFT faz medições de como os aerogeradores interagem entre si em um parque eólico.

Figura 28. Local de teste da SWiFT.



Fonte: (TEXAS TECH UNIVERSITY, 2016)

2.7.4 Clemson University SCE&G Energy Innovation Center

O *SCE&G Energy Innovation Center*, localizado em *North Charleston, South Carolina*, abriga a mais avançada instalação de testes do sistema de transmissão do mundo, capaz de realizar testes elétricos e mecânicos altamente acelerados em larga escala (NREL, 2015).

A instalação abriga duas baías de teste - um dinamômetro com potência de 7,5 MW e outro com 15 MW, de modo a ser a única instalação com esta capacidade no mundo. A instalação de testes também abriga um simulador de rede que permite fazer teste de compatibilidade de geradores com redes de transmissão elétrica de 50 ou 60 hertz (CLEMSON UNIVERSITY, 2016). O simulador de rede também vai ser designado para determinados eventos, tais como: interrupções de área de energia, flutuações de frequência, quedas de tensão, acidentes em cascata - para determinar os efeitos do aerogerador na rede elétrica, e da rede no aerogerador (ENERGY.GOV, 2016).

De maneira geral, o NWTC possibilita a seus parceiros (NREL, 2016b):

- Testar componentes de aerogeradores e de geração a partir da água e sistemas para melhoramento do projeto e redução de risco;
- Realizar análises econômicas;
- Empregar ferramentas de simulação de alto desempenho para produzir modelos realísticos de vento e de água em ambientes complexos;
- Analisar a conexão do aerogerador com a rede elétrica;
- Colaborar com especialistas para desenvolver tecnologias inovadoras e acelerar sua chegada ao mercado.

2.8 ESTAÇÃO DE ENSAIOS NATIONAL WIND ENERGY CENTRE (TÜVNEL)

O *National Wind Energy Centre* (NWECC), Figura 29, é um local de ensaios de aerogeradores da *National Engineering Laboratory* (NEL) localizado na Escócia (TÜVNEL, 2016), bem no centro do maior parque eólico em terra da Europa, o *Whitelee Wind Farm* (SCOTTISHPOWER RENEWABLES, 2016). O local oferece velocidades de vento médias elevadas e terrenos complexos (TÜVNEL, 2016).

Figura 29. National Wind Energy Centre.



Fonte: (TÜVNEL, 2016).

As conexões à rede da área de ensaios podem acomodar níveis de potência significativos e 18 postos de ensaios para cada forma e tamanho de pequenos aerogeradores. A área tem capacidade para apoiar os programas de teste formais ou as necessidades de pesquisa e desenvolvimento do fabricante, baseados no *Microgeneration Certification Scheme* (MCS) (TÜVNEL, 2016; MICROGENERATION CERTIFICATION SCHEME, 2016).

O *National Wind Energy Centre* realiza ensaios e certificação para aerogeradores de 50 kW ou menos. O fabricante pode optar por trazer a sua máquina para o local de ensaio estabelecido, ou o centro pode ajudar a identificar um local apropriado de seu interesse (TÜVNEL, 2016).

Os ensaios em aerogeradores são realizados de acordo com a norma IEC 61400-22 (Ensaio de conformidade e Certificação) e incluem:

- Desempenho de potência
- Acústico
- Carregamentos
- Avaliação de projeto

- Avaliação elétrica

2.9 ESTAÇÃO DE ENSAIOS DA UNDERWRITERS LABORATORY (UL)

As instalações de ensaios em aerogeradores da UL fica localizada no Texas e é uma das maiores do mundo. A UL trabalha em parceria com a *West Texas A&M University (WTAMU)* e oferece aos fabricantes um local para ensaios de aerogeradores de todos os portes (UNDEWRITERS LABORATORY, 2016).

O local permite que os fabricantes instalem suas máquinas para curtos e longos períodos de ensaios, dando condições para pesquisas, juntamente com medidas de desempenho e coleta de dados requeridas para se obter a certificação (UNDEWRITERS LABORATORY, 2016).

As instalações fornecem 7920 horas de vento por ano, com 519 horas acima de 15 m/s e uma média anual de velocidade de vento de 8,2 m/s a 50 m. Sua área é de cerca de 161 ha (UNDEWRITERS LABORATORY, 2016).

Seus ensaios e certificações incluem os padrões (UNDEWRITERS LABORATORY, 2016):

- Certificação UL 6142
- Ensaios AWEA 9.1 e certificação MCS
- Ensaios JSWTA 0001
- Ensaios TAP S-2000
- Certificação de tipo pela IEC 61400-1 e -2
- Modelagem e cálculos de cargas pela IEC 61400-1 e -2
- Pesquisa e ensaios de projeto
- Validação de desempenho e ensaios personalizados

Ainda realiza ensaios de campo e de laboratório para verificar as funções do aerogerador, segurança, integridade estrutural, desempenho de potência e qualidade e emissão de ruído acústico para aerogeradores de grande porte e seus componentes seguindo as normas IEC 61400 (UNDEWRITERS LABORATORY, 2016).

2.10 ESTAÇÃO DE ENSAIOS DO INSTITUTO FRAUNHOFER IWES NORTHWEST

A associação *Fraunhofer* é uma organização alemã de pesquisa que conta com institutos espalhados por toda a Alemanha, cada um voltado para uma área específica da ciência aplicada. Ao contrário de instituições de pesquisa que se concentram mais vigorosamente em pesquisa básica, a associação realiza trabalhos diretamente com a indústria, constituindo um elemento central de financiamento da organização.

Na área de energia eólica, a organização conta com a *IWES Northwest*, um Instituto que se concentra inteiramente nessa tecnologia, trabalhando em estreita aliança com parceiros industriais. Essa colaboração é importante, pois, possibilita entender as necessidades industriais e desenvolver métodos e soluções para problemas futuros (FRAUNHOFER IWES, 2016a).

Fraunhofer IWES Northwest possui uma infraestrutura de ensaio, de forma que, sistematicamente, identifica e minimiza os riscos de desenvolvimento tecnológico, elevando o padrão de qualidade, acelerando o processo de certificação e a introdução de produtos inovadores no mercado. Um bom exemplo é o processo contínuo de desenvolvimento de pás cujas fases de desenvolvimento, desde a descrição do campo eólico e a aprovação de materiais e componentes até os ensaios completos, podem ser avaliadas e validadas (FRAUNHOFER IWES, 2016c)-

Fraunhofer IWES conta com centros e laboratórios especializados, entre eles:

- Centro de ensaios em pás;
- Centro de ensaios/testes em estruturas de apoio;
- Laboratório de ensaios/testes em nacele; e
- Centro de aplicação para medições de campo.

2.11 CENTRO DE INVESTIGACIONES ENERGÉTICAS, MEDIOAMBIENTALES Y TECNOLÓGICAS (CIEMAT)

O CIEMAT é um Organismo Público de Investigação pertencente ao Ministério de Economia e Competitividade através da Secretaria de Estado de Investigação, Desenvolvimento e Inovação da Espanha, focado principalmente nos âmbitos de energia e meio ambiente. O CIEMAT ocupa uma posição intermediária na cadeia que vai desde a criação de conhecimento básico até a aplicação industrial, de modo que seus trabalhos sempre procuram estabelecer ligação entre o ramo de P&D + I e questões de interesse social (CIEMAT, 2016a).

Desde 1951, como Junta de Energia Nuclear (JEN), e desde 1986 como CIEMAT, o centro realiza atividades de P&D + I na área de energia e tem como prioridades o estudo, desenvolvimento, promoção e valorização das diferentes fontes de energia: recursos renováveis, geração a partir da fusão, fissão e combustíveis fósseis; o estudo dos seus impactos sobre o meio ambiente; o desenvolvimento de novas tecnologias; além de áreas de investigação fundamental como a física de alta energia e biomedicina (CIEMAT, 2016a).

A área de recursos renováveis é uma das parcelas mais importantes do trabalho do CIEMAT e abrange as seguintes áreas: cadeia energética associada com a biomassa, a produção de biocombustíveis de segunda geração, as tecnologias energéticas de concentração solar, a energia solar fotovoltaica, a energia das ondas e o estudo da energia eólica (com foco em aerogeradores de baixa potência para geração distribuída) (CIEMAT, 2016b).

Entre as diferentes tecnologias de geração eólica existentes, o CIEMAT trabalha ainda no desenvolvimento de novas formas de utilização dessa energia em ambientes operacionais isolados ou de fraca conexão à rede. Além disso, o CIEMAT tem se especializado no desenvolvimento de sistemas que facilitem a sua integração contra flutuações na rede e o desenvolvimento de novos algoritmos de previsão a curto prazo dos recursos eólicos (CIEMAT, 2016c).

O CIEMAT colabora no projeto de novos aerogeradores na área de projeto aerodinâmico e estrutural das pás. Além disso, colabora com fabricantes espanhóis e de outros países na realização de ensaios de APPs e na avaliação de sistemas isolados. O CIEMAT também trabalha em sistemas híbridos e no desenvolvimento de regulamentos para os APPs (CIEMAT, 2016d).

Além disso, o CIEMAT dispõe de um laboratório acreditado pela *Entidad Nacional de Acreditación*, ENAC (ISO/IEC 17025) para ensaios de qualquer tipo de aerogerador, entre eles (CIEMAT, 2016d):

- Ensaio de curva de potência;
- Ensaio de medição de ruído acústico;
- E dois ensaios específicos para a certificação de APPs:
- Ensaio de Duração;
- Ensaio de segurança e função.

Para a realização dos ensaios, o CIEMAT tem na província de *Soria* cinco postos de ensaios: dois no Porto de *Oncala (Soria)* e três no CEDER -*Lubia (Soria)*.

O CIEMAT vem desenvolvendo algumas atividades de pesquisa em sistemas isolados e ligados à rede durante os últimos anos, focado principalmente na caracterização de APP (desempenho de potência, ruído, duração e segurança). A maioria dos resultados obtidos até agora são relativos às medições de curvas de potência de APP, quer ligadas à rede ou conectadas a sistemas autônomos (CANO, IZQUIERDO, *et al.*, 2009).

Além disso, há iniciativas em vários países com o fim de instalar APP nos telhados ou no chão, ligados à rede, nos quais existem tarifas *feed-in* (FIT) por kWh gerados (abordado no **Capítulo 4**). Isso pode favorecer o mercado dos APPs em todo o mundo, portanto, uma norma, recomendação internacional ou processo deveria ser desenvolvido, de modo a obter aumento no mercado de APP em nível mundial (CANO, IZQUIERDO, *et al.*, 2009).

Por esta razão, o governo espanhol criou uma série de programas nacionais, chamados PSE (Projetos Singulares e Estratégicos), em que vários temas estratégicos são considerados. Um

desses temas é pauta do PSE-Minieólica, um projeto científico-tecnológico incluído no Plano Nacional Espanhol para P&D, focado no uso de APPs ligados à rede, cujos objetivos principais são:

- Aumentar a confiabilidade e o número de exportações de máquinas espanholas;
- Capacitar a certificação e homologação de aerogeradores de acordo com as normas em vigor; e
- Aumentar a economia de eletricidade em residências e indústrias obtendo diminuição na demanda de energia externa (CANO, IZQUIERDO, *et al.*, 2009).

Referindo-se às atividades que a instalação do CIEMAT está preparada para desenvolver, pode-se citar (CANO, IZQUIERDO, *et al.*, 2009):

- Desempenho de potência de APP de acordo com a norma IEC 61400-12-1 no seu anexo H;
- Medição ruído de APP em conformidade com a norma IEC 61400-11;
- Ensaio de Durabilidade e de Segurança de APP, em conformidade com a norma IEC 61400-2;
- Qualidade de Energia dos inversores utilizados, bem como, em fotovoltaicos ou APP conectado à rede;
- Avaliação de sistemas híbridos de modo a obter curvas de eficiência, os melhores protocolos de controle, etc;
- Testes estáticos em pás com um comprimento nominal de até 10 m., de acordo com IEC 61400-23.

No CIEMAT há duas instalações onde os ensaios podem ser realizados (Figuras 30 e 31). Com as três fases, ter-se-ia uma infraestrutura de ensaio bastante versátil, sendo possível estudar, desenvolver, ensaiar e medir APP de qualquer tamanho ou tipo (CANO, IZQUIERDO, *et al.*, 2009).

Figura 30. Instalação de teste em CEDER (Soria), Fase I.



Fonte: (CANO, IZQUIERDO, *et al.*, 2009).

Figura 31. Instalação de teste em CEDER (Soria), Fase II.



Fonte: (CANO, IZQUIERDO, *et al.*, 2009).

O CIEMAT também trabalha na avaliação de componentes de APP, tais como geradores, pás, rotores, etc., atividade para qual vários bancos de ensaio estão instalados, entre eles o Banco de Ensaios de pá (Figura 32), utilizado para caracterizar pás de 1 a 10 m de comprimento (CANO, IZQUIERDO, *et al.*, 2009).

Figura 32. Banco de ensaios de pás.



Fonte: (CANO, IZQUIERDO, et al., 2009).

Como elucidado anteriormente, uma das atividades no PSE Mini-eólica do CIEMAT constitui um subprojeto focado nos ensaios e na certificação de APPs espanhóis. Tal subprojeto teve seu início em 2008 e várias medições foram realizadas desde então (CANO, IZQUIERDO, *et al.*, 2009).

2.12 ESTAÇÃO DE ENSAIOS ENERGY RESEARCH CENTRE OF THE NETHERLANDS (ECN)

O *Energy Research Centre of the Netherlands* (ECN) é o maior instituto de pesquisa em energia na Holanda. O ECN trabalha no desenvolvimento de novas tecnologias e conduz pesquisas em várias áreas inovadoras para facilitar a gestão de energia sustentável. O ECN está ativo em projetos tanto no mercado interno como no exterior, em esforços conjuntos com a indústria, autoridades governamentais e institutos de pesquisa. O ECN tem escritórios em diversos lugares como: *Petten* (escritório principal), *Amsterdã*, *Eindhoven*, *Bruxelas* e *China* (ECN, 2016a).

Em 2012, o setor de energia eólica holandês - uma aliança entre a indústria, os institutos de P&D e universidades - adotou o Contrato de Inovação de Energia Eólica *Offshore*. O projeto de pesquisa em energia eólica do ECN constitui parte integrante desse contrato que é inteiramente dedicado a projetos de pesquisa para a indústria eólica holandesa (ECN, 2016b).

O programa de P&D da ECN apresenta grande foco em plantas *offshore*. Os trabalhos de pesquisa estão predominantemente voltados para a redução do custo da energia *offshore* ou para o

aumento do lucro sobre o investimento. No entanto, o ECN Wind oferece serviços adicionais que consistem na realização de medições acreditadas como também nos trabalhos de análise, avaliação e outras medições, como por exemplo (ECN, 2014a):

- Determinação e validação do desempenho de potência dos aerogeradores (IEC 61400-12);
- Determinação e validação da carga média e fadiga mecânica dos componentes do aerogerador (IEC 61400-13);
- Medições de ruído acústico (IEC 61400-11);
- Medição do desalinhamento de *yaw*;
- Melhora e análise do desempenho de parque eólico;
- Medições de visualização do fluxo em torno da pá para a otimização do design e da potência de saída;
- Análise de desempenho dos componentes, incluindo medidas de vibração;
- Avaliação da fonte eólica;
- Monitoramento da colisão com pássaros.

O ECN *Wind turbine Test site Wieringermeer* (EWTW) está situado no município de *Hollands Kroon*, localizado ao sul da aldeia *Kreileroord* (Figura 33) a cerca de 30 km de distância do escritório principal do ECN, em *Petten*. O porto "*De Oude Zeug*" está a 8 km e pode ser utilizado para o transporte de grandes componentes do aerogerador. Neste porto, também está a instalação de ensaios de pá WMC (*Wind Turbine Materials and Construction*) (ECN, 2014b).

Figura 33. Área de ensaios do ECN.



Fonte: (ENERGY RESEARCH CENTRE OF THE NETHERLANDS, 2008).

A instalação eólica do EWTW - ECN (Figura 34) consiste numa combinação de um parque eólico de aerogeradores comerciais para P&D e seis locais de testes para protótipos. Como suporte à instalação tem-se cinco torres meteorológicas, uma conexão à rede de 36 MVA, a infraestrutura de medição, equipamentos de coleta de dados, e um centro de controle local dos ensaios/testes. O lugar tem um clima de vento favorável: a velocidade média do vento a 100 m de altura é de 8,3 m/s (ECN, 2014b).

Figura 34. Leiaute do EWTW.



Fonte: (ECN, 2014b).

Além disso, no local também são realizados ensaios/testes para aerogeradores de menor porte (Figura 35). São dez APPs de 9,8 kW em uma altura do cubo de 7,5 m.

Figura 35. APPs no ECN.

Fonte: (ENERGY RESEARCH CENTRE OF THE NETHERLANDS, 2008).

O parque eólico para P&D é composto por cinco aerogeradores com potência nominal de 2,5 MW. Eles apresentam capacidade de produzir anualmente cerca de 28 GWh, produção que propicia uma melhor exploração financeira do local. Os aerogeradores têm sido utilizados extensivamente pelo ECN e por seus parceiros internacionais para execução de programas de P&D específicos e verificação de ferramentas de projeto. O foco do trabalho tem sido atividades de P&D de médio e longo prazo nas áreas de: aerodinâmica e controle da máquina e do parque eólico; monitoramento de condição e de carga; e otimização de estratégias de O&M (Organização e Método) (ECN, 2014b).

Os seis locais de teste de protótipo disponibilizam aos fabricantes testar e otimizar protótipos e executar campanhas de medição para fins de certificação. Devido ao vento favorável, os testes podem ser executados nas velocidades de vento desejadas em um curto espaço de tempo. O local é projetado e bem equipado para realizar medições de desempenho de energia, medições de carga mecânica, medições de ruído e medições elétricas, de acordo com os padrões da IEC 61400. A equipe é acreditada pela ISO 17025 e MEASNET, garantindo que os resultados de medição possam ser utilizados para propósitos de certificação (ECN, 2014b).

Em virtude do sucesso do EWTW, o ECN está expandindo seu local de teste. A ampliação está prevista para o parque eólico P&D, substituindo as cinco aerogeradores N80 por oito aerogeradores maiores. O número de protótipos instalados aumentará de seis para nove. O local já expandido estará disponível no início de 2018 (ECN, 2014b).

2.13 CENTRE FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES AND SAVING

O *Centre for Renewable Energy Sources and Saving* (CRES) é uma entidade nacional grega de incentivo às fontes de energia renováveis e ao uso racional e econômico de energia. No setor moderno de demanda energética, o CRES é dinamicamente ativo, no quadro de política e legislação nacional, nas áreas de preservação ambiental e desenvolvimento sustentável. Trabalhando no estado da arte do desenvolvimento tecnológico, o CRES implementa projetos inovadores e atividades significativas para a promoção e penetração no mercado de novas tecnologias energéticas (KANE CRES, 2017).

CRES foi fundado em setembro de 1987 pelo Decreto Presidencial 375/87. É uma entidade pública com independência financeira e administrativa supervisionada pelo Ministério de Meio Ambiente e Energia. O seu principal objetivo é a pesquisa e promoção de aplicações de fontes renováveis e uso racional e econômico da energia a níveis nacional e internacional, bem como o apoio a atividades relacionadas, levando em consideração os princípios do desenvolvimento sustentável (CRES, 2017).

2.13.1 Demonstration Wind Farm

O CRES opera o *Demonstration Wind Farm* (Figura 36) desde 1998 (PENA, 2017). Desenvolvido pelo próprio centro, o parque tem capacidade de 3 MW e os seguintes objetivos (KANE, 2017):

- Testar as características de várias tecnologias eólicas de exploração de energia em topografia de terreno complexo;
- Contribuir para o desenvolvimento da indústria grega de aerogeradores;
- Demonstrar e disseminar sistemas de energia eólica;

- Realizar trabalhos de pesquisa para a integração de tecnologias eólicas com sistemas de produção, armazenamento e utilização de hidrogênio, sistemas de dessalinização de água, etc.;
- Lucrar nas vendas de eletricidade, contribuindo para a independência financeira do CRES.

O parque eólico do CRES está situado em *Lavrion, SE Attica*, (latitude: 37,76; longitude: 24,06 em graus decimais). Sua operação se dá em terreno complexo, abrigando regiões costeiras e morros de até 120 metros de altura acima do nível do mar. A energia produzida a partir dos aerogeradores alimenta a rede elétrica interligada de 20 kV. Dois mastros meteorológicos (de 100 e 40 metros), são usados para medir as condições de vento. Há cinco aerogeradores de diferentes tamanhos instalados no parque. Três destas máquinas são comerciais e duas são protótipos desenvolvidos na Grécia (OA-500 kW e OA-600 kW), Figura 36 (KANE, 2017).

Figura 36. Demonstration Wind Farm.



Fonte: (KANE, 2017).

2.13.2 Monitoramento da operação

Todos os aerogeradores são equipados com conexões de fibra óptica, a fim de transmitir com precisão dezenas de sinais, permitindo avaliar o desempenho da máquina. Os dados operacionais de cada aerogerador são registrados pelo uso de um *software* desenvolvido pelo Centro. O *software* se comunica com os aerogeradores, faz o monitoramento continuamente, armazenando todos os dados (velocidade do vento, potência, tensões, etc.). Além disso, analisa os dados previamente registrados, atualiza um *website* (web site da referência bibliográfica através do qual pode-se ter acesso aos últimos 10 minutos de dados) e envia resultados via mensagens SMS e

WAP. O sistema é projetado não só para os administradores, mas também para os usuários simples, buscando informações gerais sobre a operação do parque eólico (Figura 37). Os administradores recebem informações detalhadas por *Short Message Service* (SMS) e via *e-mail* e têm total acesso ao banco de dados de operação (KANE, 2017).

Figura 37. Vista da entrada do parque.



Fonte: (GOOGLE EARTH, 2014).

2.13.3 Laboratórios e serviços do CRES

Há no CRES Laboratórios de Sistemas Eólicos incluindo (KANE CRES, 2017):

- Um laboratório de ensaios/testes em aerogeradores inclusive um laboratório para ensaios/testes de pás de 25m;
- Uma estação para ensaios/testes de aerogeradores;
- Uma instalação de sistemas híbridos (diesel-eólico);
- Uma rede de 100 estações para caracterização do vento.

Os Laboratórios de Sistemas Eólicos oferecem os seguintes serviços:

- Medição de aerogeradores, ensaiando/testando características operacionais (medições de curva de potência, de qualidade de energia, níveis de ruído);
- Ensaios de fadiga (cargas aerodinâmicas e mecânicas);
- Ensaios de pá (ensaios estáticos, de fadiga e dinâmicos);
- Calibração de anemômetro;
- Avaliação da fonte eólica;

- Estimativa do potencial eólico em terrenos complexos por meio de uma ferramenta numérica desenvolvida internamente;
- Análise e projeto de eixo horizontal de aerogeradores por meio de um simulador aeroelástico desenvolvido internamente;
- Serviços de laboratório de sistemas híbridos de vento e diesel (economia de combustível, estabilidade do sistema, etc.).

2.14 CENTRE FOR WIND ENERGY TECHNOLOGY (C-WET)

O *National Institute of Wind Energy* (NIWE) (Figura 38) ou *Centre for Wind Energy Technology* (C-WET) foi estabelecido em *Chennai* no ano de 1998, como uma instituição P&D autônoma pelo *Ministry of New and Renewable Energy* (MNRE), Governo da Índia. É uma instituição dedicada ao conhecimento, que oferece serviços e procura solucionar as dificuldades e promover melhorias no setor de energia eólica por meio de pesquisas. O C-WET tem, em *Kayathar*, a estação de testes *Wind Turbine Test Station* (WTTS) com o apoio técnico e financeiro da DANIDA, Governo da Dinamarca (C-WET, 2011).

Figura 38. National Institute of Wind Energy.



Fonte: Adaptado de (NIWE, 2015b).

O C-WET funciona dividido em diversas unidades especializadas em determinadas áreas. A estrutura é a seguinte (C-WET, 2011):

- **Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento** - Seu principal foco consiste no

desenvolvimento de componentes de aerogeradores por meio de trabalhos de colaboração com outras instituições/indústrias de P&D;

- **Unidade de Avaliação dos Recursos Eólicos** - A unidade identifica regiões ricas em recursos no país pela realização de pesquisas e oferece seus serviços para os desenvolvedores de parques eólicos;
- **Unidade de serviços comerciais, de treinamento e de informação** - Estabelece e atualiza o banco de dados com o objetivo de servir como o melhor centro informativo em energia eólica pela coleta e análise de dados;
- **Unidade de Ensaios/Testes** - Desenvolve instalações de ensaios/testes em aerogeradores de acordo com padrões internacionais (IEC e *Type Approval Provisional Scheme* – TAPS-2000).
- **Unidade de padrões e certificação** - A unidade executa a Certificação Provisória de aerogeradores de acordo com o Esquema de Certificação Indiano – *Type Approval Provisional Scheme* – TAPS – 2000 (alterada). Normas relativas à energia eólica também são desenvolvidas pela unidade.

Destinada à realização de ensaios e localizada em *Kayathar*, a estação (Figura 39) atualmente apresenta as seguintes características: possui dois bancos de ensaios com ligação à rede para aerogeradores de capacidades de até 1250 kW e 400 kW; cada banco com sua sala de controle é equipado com sistemas sofisticados de aquisição de dados, com software validado e arquitetura no estado de arte; dois mastros meteorológicos estão disponíveis na frente de cada posto de ensaio/teste; o terreno é levemente inclinado para a direção oeste, o qual é também a direção predominante do vento, onde a melhor época é de abril a setembro, período durante o qual os ensaios são realizados (NIWE, 2015a).

Figura 39. Wind Turbine Test Station.



Fonte: Adaptado de (NIWE, 2015b).

O NIWE estabeleceu o *Wind Turbine Research Station* (Figura 40), em *Kayathar*, para a condução de atividades de P&D. Além de atividades relacionadas à P&D, a estação oferece instalações destinadas à realização de ensaios de tipo e verificação de desempenho de pequenos aerogeradores. O NIWE busca esforços estratégicos para melhorar a eficiência das máquinas que compõem a infraestrutura de P&D, com a finalidade de um mínimo consumo de energia (NIWE, 2015c).

Figura 40. Wind Turbine Research Station.



Fonte: Adaptado de (NIWE, 2015b)

2.15 CHINA GENERAL CERTIFICATION CENTER (CGC)

O *China General Certification Center* é localizado em Pequim e foi fundado em 2003 com autorização do governo e acreditado desde 2008 pela *China National Accreditation Service for Conformity Assessment* (CNAS). O centro está voltado para a área de energias renováveis, e no

campo de energia eólica fornece serviços de desenvolvimento de normas, parques eólicos, certificação, execução de ensaios (Figura 41), estudo e consultoria, e treinamentos. Na categoria de ensaios tem-se no CGC os seguintes serviços prestados (YU, 2013):

Ensaio em aerogeradores:

- Desempenho de potência;
- Medição de qualidade de energia;
- Medição de carga mecânica;
- Medição de ruído acústico.

Figura 41. Ensaio de aerogerador.



Fonte: (YU, 2013).

Ensaio de componente (Figura 42):

- Testes estáticos e de fadiga;
- Testes do material da pá.

Figura 42. Exemplo de ensaio de componente (pá).



Fonte: (YU, 2013).

2.16 ENTIDADES CERTIFICADORAS

A certificação de aerogeradores envolve três etapas distintas: estabelecimento de padrões de desempenho; a realização dos ensaios; e a atuação de um organismo de certificação independente. Todas essas etapas são necessárias para implementar a certificação (SMALL WIND CERTIFICATION COUNCIL, 2016).

Aerogeradores de pequeno e médio portes têm um grande potencial para atender à crescente demanda por geração distribuída e podem ser uma solução de baixo custo para muitas casas, fazendas, escolas e outros consumidores finais. A tecnologia eólica distribuída oferece maior segurança no fornecimento de energia, bem como a conscientização da comunidade de opções de energia limpa (SMALL WIND CERTIFICATION COUNCIL, 2016).

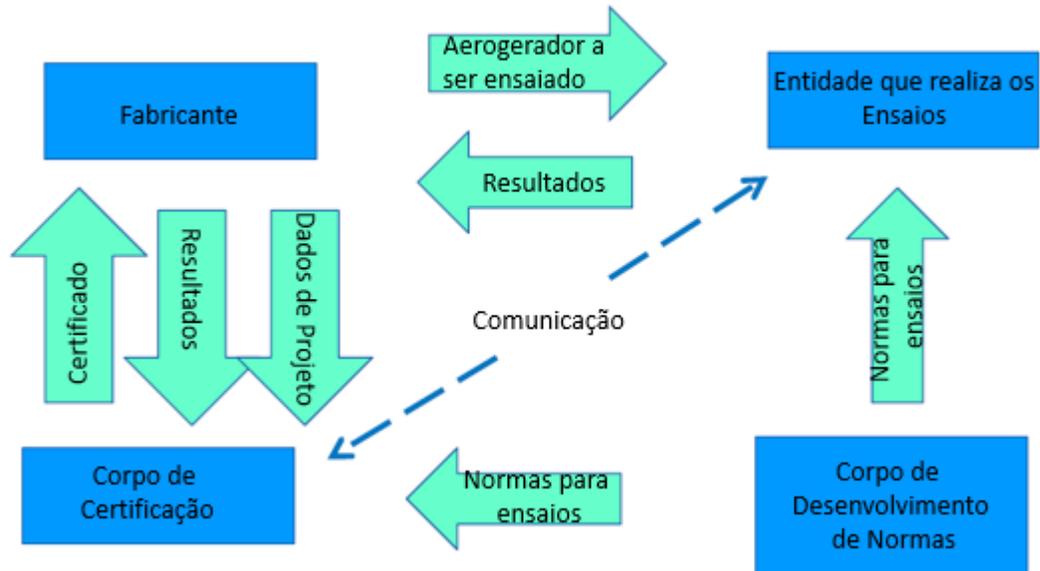
Porém, ainda existem muitos obstáculos a serem superados como:

- Especificações de desempenho não-padronizados e informações inconsistentes dos fornecedores;
- A falta de ferramentas de fácil utilização para que os consumidores estimem com precisão o desempenho energético;
- Necessidade de uma maior garantia de segurança, funcionalidade e durabilidade para os consumidores e agências que oferecem incentivos financeiros para justificar os investimentos;
- Os testes de campo foram realizados em menos de metade dos pequenos aerogeradores no mercado.

A solução para superar esses obstáculos é a certificação. Consumidores podem comparar e assegurar que os aerogeradores são funcionais, seguros, possuem bom desempenho e durabilidade e com isso as agências de financiamento têm maior garantia de retorno. A certificação ajuda a prevenir falsas informações do fabricante, garantindo assim a proteção dos consumidores e credibilidade no setor (SMALL WIND CERTIFICATION COUNCIL, 2016).

O processo de certificação atual resume-se basicamente ao fluxograma da Figura 43.

Figura 43. Fluxograma de certificação de aerogeradores.



Fonte: Adaptado de (JIMENEZ, FORSYTH, *et al.*, 2011).

Esse fluxograma mostra que existe um corpo que desenvolve as normas técnicas para ensaios e verificação de projetos e estas são adquiridas pela entidade de ensaios e pelo corpo de certificação, não apenas. Ambos estão em constante comunicação e acompanhamento dos ensaios que estão sendo realizados. Por parte do fabricante, este fornece os dados do projeto da máquina para o corpo de certificação e o aerogerador a ser ensaiado para a entidade que realizará o(s) ensaio(s) solicitado(s) pelo mesmo. Por fim, o(s) resultado(s) do(s) ensaio(s) é entregue ao fabricante, o qual repassa para o corpo de certificação que finalmente emite o certificado ao fabricante.

Nos subtópicos a seguir serão mostrados e brevemente descritos os principais corpos certificadores do mundo.

2.16.1 Small Wind Certification Council (SWCC)

Em 2006, um grupo formado por entidades governamentais e pessoas físicas, todas com interesses em desenvolver a tecnologia de aerogeradores de pequeno porte nos EUA, reconheceram a necessidade de um corpo que pudesse verificar independentemente seus desempenhos. Assim, foi estabelecido o *Small Wind Certification Committee Working Group* que

era formado por mais de 60 entidades incluindo os fabricantes dos EUA e Canadá, bem como universidades e pessoas físicas chaves (SMALL WIND CERTIFICATION COUNCIL, 2016).

Em 2006 e 2007, o Grupo de Trabalho elaborou um plano de organização abrangente para o *Small Wind Certification Council* (SWCC). Esta continha a pesquisa de mercado que demonstrou a necessidade, a declaração de missão, juntamente com uma descrição dos serviços a serem prestados, a estrutura do Conselho, funcionários e suas funções, planos de financiamento e de comercialização, prazos e outras informações (SMALL WIND CERTIFICATION COUNCIL, 2016).

No início de 2008, o SWCC avançou para uma nova fase de seu desenvolvimento quando incorporado como uma nova organização sem fins lucrativos, elegeu seu primeiro Conselho e começou a contratar pessoal. Até 2009, o SWCC desenvolveu as políticas e procedimentos que regem o processo de certificação. O SWCC começou a aceitar pedidos de certificação em fevereiro de 2010 (SMALL WIND CERTIFICATION COUNCIL, 2016). Dentre as competências do SWCC estão:

- Certificar pequenos e médios aerogeradores: o SWCC é um organismo de certificação independente criado para atender o mercado norte-americano. SWCC certifica aerogeradores que estão em conformidade com os padrões da indústria.
- Emissão de Selos: para pequenos aerogeradores, o SWCC emite selos de fácil compreensão para a produção anual de energia, potência máxima e ruído acústico. A etiqueta também informa que o aerogerador cumpre requisitos de durabilidade e de segurança. Como os aerogeradores são certificados, o SWCC publica as curvas de potência, as curvas anuais de desempenho energético e medidas dos níveis de pressão sonora para cada máquina.

A certificação do SWCC é uma confirmação independente emitida por um corpo de certificação acreditado de que o aerogerador foi ensaiado e projetado de acordo com os requisitos da norma AWEA. O SWCC é acreditado pela *American Association of Laboratory Accreditation* (A2LA) para certificar aerogeradores de acordo com os padrões AWEA 9.1-2009, IEC 61400-12-1 e -11 (SMALL WIND CERTIFICATION COUNCIL, 2016).

2.16.2 Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK)

Localizada no Japão, no *Renewable Energy Department*, desde dezembro de 2011 a ClassNK atua como uma organização de certificação e aceita resultados obtidos nos ensaios baseados em normas internacionais (IEC 61400-2, -11, -12-1) e realizada por organismos de ensaios que são reconhecidos como um corpo de ensaio por um organismo de acreditação internacional (membro do IAF MLA - *International Accreditation Forum Multilateral Recognition Arrangement*) (CLASSNK, 2016).

Esta certificação é baseada na norma JSWT A0001. O escopo da certificação também inclui o inversor, que muitas vezes tem que cumprir requisitos especiais por empresas de energia japonesas no caso de sistemas de aerogeradores conectados à rede (CLASSNK, 2016).

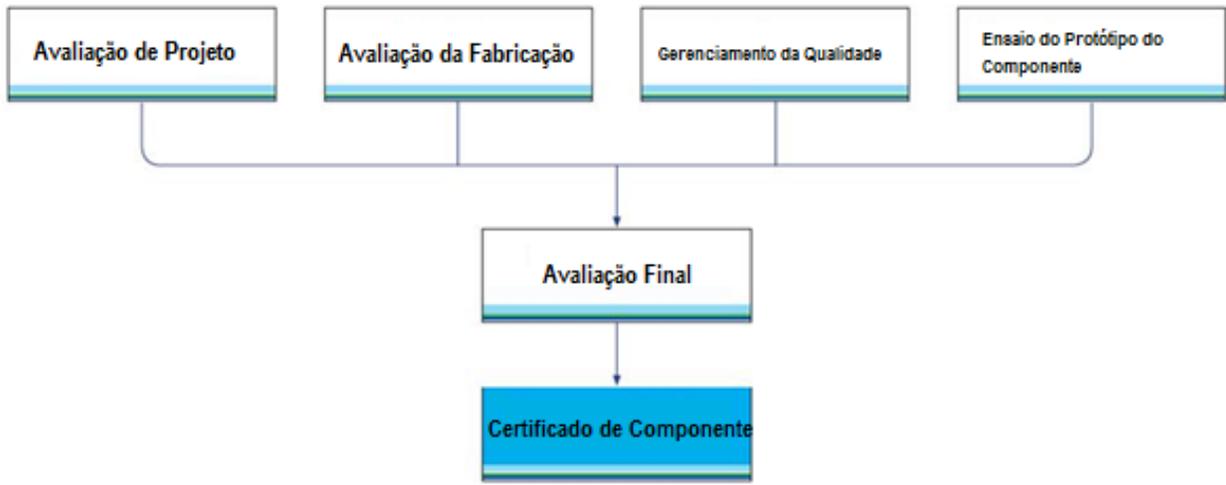
2.16.3 Technischer Überwachungsverein (TÜV Rheinland)

A TÜV Rheinland está situada na Alemanha e atua no mercado há mais de 140 anos. Com o crescimento da indústria eólica observou a necessidade de certificação dessas máquinas. É acreditada pelo Corpo de Acreditação da Alemanha (do acrônimo em alemão DAkkS) como um corpo de certificação de tipo e componente. A TÜV certifica os aerogeradores pelas normas IEC 61400-22, para grande porte, e a 61400-2, para pequeno porte (TÜV RHEINLAND, 2016).

2.16.4 Det Norske Veritas Germanischer Lloyd (DNV GL)

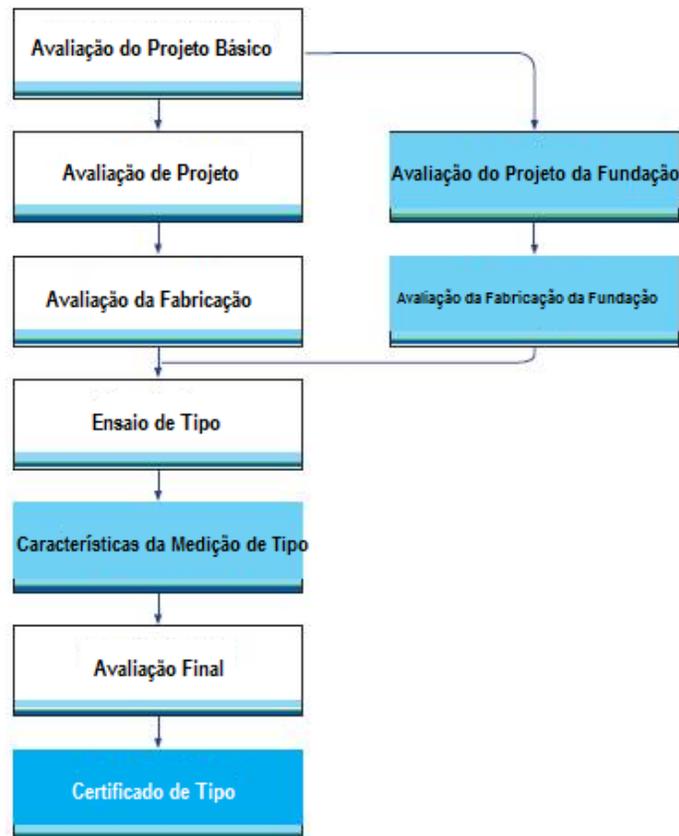
Assim como a TÜV Rheinland, a DNV GL está localizada na Alemanha e realiza certificação de componente e de tipo (DNV GL, 2016). A Figura 44 mostra os módulos de uma certificação de componente e a Figura 45 os de certificação de tipo.

Figura 44. Módulos de uma certificação de componente.



Fonte: Adaptado de (DNV GL, 2016).

Figura 45. Módulos de uma certificação de tipo.



Fonte: Adaptado de (DNV GL, 2016).

A DNV GL também emite certificados para aerogeradores de pequeno porte. As avaliações do produto estão de acordo com a IEC 61400-2 e incluem aspectos como funcionalidade, segurança e integridade (DNV GL, 2016). Além disso, ela também realiza ensaios de tipo de acordo com as normas IEC 61400 (DNV GL, 2016).

2.16.5 Underwriters Laboratory (UL)

A UL é uma entidade acreditada pela *Deutsche Akkreditierungsstelle* (DAkKS) e oferece serviços de certificação para aerogeradores e seus componentes baseada nas normas internacionais como a família IEC 61400, as instruções da GL, e a UL 6141 (UNDEWRITERS LABORATORY, 2016). As certificações incluem (UNDEWRITERS LABORATORY, 2015):

- Tipo e Componente – para confirmar que o aerogerador ou componente foi desenvolvido pelo fabricante em conformidade com as hipóteses de projeto, padrões específicos e outras exigências técnicas;
- Projeto – para garantir a adequabilidade da certificação de tipo de aerogeradores e suas fundações, de acordo com o local onde será instalado;
- Conformidade da rede – para assegurar que a potência gerada esteja em conformidade com as regras locais de conexão.

2.16.6 TD Engineering

A *TD Engineering* está localizada na Dinamarca, onde está estabelecida desde 2005. Seu objetivo é fornecer serviços de consultoria para a indústria eólica. A companhia obteve os direitos emitir certificados de tipo da *Danish Energy Agency* para APPs instaladas na Dinamarca de acordo com as normas locais (BEK73). Também emitem certificados para aerogeradores de grande porte, obedecendo as normas IEC 61400-2 e -22 respectivamente.

Além de emitir certificados, também está apta a realizar ensaios de Segurança e Função e de Duração para APPs (TD ENGINEERING, 2016).

2.16.7 Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO)

A Portaria nº 168, publicada pelo INMETRO em 23 de março de 2015, estabelece os requisitos para certificação voluntária de aerogeradores destinados à produção de energia elétrica. No documento, os critérios para certificação têm foco no desempenho, atendendo às exigências presentes nas normas técnicas ABNT NBR IEC 61400-12-1 – que trata do desempenho dos aerogeradores - e IEC 61400-11 – que lida com o ruído gerado pelos aerogeradores. Com isso, foram estabelecidos os seguintes modelos de certificação, ambos com validade inicial de quatro anos (INMETRO, 2015):

- **Modelo de Certificação 4:** Ensaio de tipo seguido de verificação através de ensaio em amostras retiradas no comércio ou no fabricante para aerogeradores de potência nominal até 100 kW;
- **Modelo de Certificação 5:** Ensaio de tipo, avaliação e aprovação do Sistema de Gestão da Qualidade do fabricante, acompanhamento através de auditorias no fabricante, para aerogeradores de qualquer potência nominal.

Segundo a Portaria, em ambos os modelos, todos os ensaios na amostra devem ser executados de acordo com as duas normas técnicas citadas. No entanto, a amostra é considerada aprovada apenas se apresentar sua faixa de classificação de eficiência energética declarada condizente com a mesma verificada nos ensaios.

As classificações da eficiência energética dos aerogeradores são realizadas através do cálculo do coeficiente de potência – C_p , que é a relação entre a potência produzida e a potência disponível no vento – considerando-se o tipo da máquina (horizontal ou vertical) e sua potência nominal (abaixo ou acima de 100 kW). O cálculo do C_p é baseado na Norma ABNT NBR IEC 61400-12-1 e leva em conta a potência elétrica produzida. A Tabela 4 mostra a classificação de eficiência energética dos aerogeradores de eixo horizontal de até 100 kW de acordo com a faixa de C_p .

Tabela 4. Classificação dos aerogeradores de até 100 kW.

Coeficiente de Potência, C_p	Classificação
$C_p \geq 0,35$	A
$0,31 \leq C_p < 0,35$	B
$0,27 \leq C_p < 0,31$	C
$0,23 \leq C_p < 0,27$	D
$C_p < 0,23$	E

Fonte: (INMETRO, 2015, p. 10).

O selo do INMETRO, ilustrado na Figura 46, expõe essa escala de classificação, em que A expressa maior eficiência, enquanto E, menor eficiência.

Figura 46. Selo de identificação da conformidade.



Fonte: INMETRO (2015).

No Brasil ainda não há Organismos Certificadores de aerogeradores que sejam acreditados pelo INMETRO, embora existam laboratórios capacitados que podem realizar os ensaios estabelecidos na Portaria supracitada, como é o caso dos laboratórios da PUC-RS, do IPT-USP e da UFRGS, porém em túneis de vento (REAL, 2015). Isso significa que, se alguma empresa nacional fabricar ou importar algum tipo de aerogerador e queira de alguma forma certificá-lo, não terá como recorrer, aqui no Brasil, a qualquer entidade acreditada que preste os serviços de ensaios em condições de campo aberto (SILVA, DE OLIVEIRA FILHO, *et al.*, 2016).

Futuramente, no entanto, caso Organismos Certificadores passem a ser acreditados pelo INMETRO para certificar aerogeradores, apenas cumprir os requisitos estabelecidos na Portaria

168/2015 não garantirá a duração, segurança, funcionalidade e qualidade da energia dos aerogeradores certificados. Embora esses laboratórios possam ter competência para conduzir os ensaios estabelecidos pelas normas citadas no documento, os aerogeradores de pequeno porte que não são certificados segundo as normas IEC 61400-2 e ABNT-NBR IEC 61400-21 não oferecem as garantias de duração, segurança, funcionalidade e qualidade de energia ao consumidor (SILVA, DE OLIVEIRA FILHO, *et al.*, 2016).

2.17 RESUMO DO CAPÍTULO 2

Este **Capítulo 2** evidenciou o histórico sobre a certificação de aerogeradores no mundo. Mostrou sua evolução e a importância de se ter um local para ensaiar e testar experimentalmente as máquinas. Evidenciou também os processos de certificação de uma forma geral. Não obstante, neste capítulo também **foi proposta uma definição e diferenciação entre os termos ensaio e teste.**

Os ensaios realizados são estabelecidos por normas. A IEC possui um conjunto de normas para ensaios de aerogeradores que é da família 61400. Porém, vários países já estão adaptando, ou já adaptaram, estas para as suas realidades de regime de vento, algo que o Brasil deveria também acompanhar.

Observa-se que há uma preocupação tanto do ponto de vista do consumidor quanto do próprio fabricante em assegurar a qualidade e segurança do seu produto, visto o número de áreas de ensaios/testes e certificadoras ao redor do mundo.

Do exposto, fica evidente que há uma necessidade de se instalar um centro de ensaios e testes no Brasil, não apenas para atender a demanda local, mas de toda a América do Sul nesse setor, pois, irá gerar o desenvolvimento tecnológico em uma área onde o país é carente, além de garantir a qualidade e segurança dos equipamentos/máquinas aqui instalados. A Tabela 5 resume as principais contribuições/funções dessas estações de ensaios.

Tabela 5. Resumo das principais contribuições/funções das áreas de ensaios.

Estação	País	Contribuição/função
Rocky Flats	EUA	Métodos de ensaio normalizados para determinar curvas de potência.
USDA	EUA	Ensaiou ou uma variedade de APPs em aplicações agrícolas e rurais.
Riso	Dinamarca	Impediu que aerogeradores subdesenvolvidos, ou mal desenvolvidos, entrassem no mercado europeu em qualquer quantidade.
AWTS	Canadá	Contribuiu para o desenvolvimento da energia eólica em todo o Canadá.
NWTC	EUA	Fornecer as condições de ensaios em laboratório e de campo necessárias para o desenvolvimento de aerogeradores.
TÜVNEL	Escócia	Realiza ensaios e certificação para aerogeradores de 50 kW ou menos.
UL	EUA	Ensaios e certificação.
IWES	Alemanha	Trabalha com parceiros industriais possibilitando novos métodos e soluções. Identifica e minimiza os riscos de desenvolvimento tecnológico.
CIEMAT	Espanha	Ensaios e desenvolvimento de aerogeradores.
ECN	Holanda	Desenvolve de novas tecnologias e conduz pesquisas em várias áreas inovadoras para facilitar a gestão de energia sustentável.
CRES	Grécia	Implementa projetos inovadores no mercado de novas tecnologias energéticas.
C-WET	Índia	Ensaios e desenvolvimento de aerogeradores.
CGC	China	Desenvolve normas, parques eólicos, certificação, execução de ensaios, estudo e consultoria e treinamentos.

3 EXPERIÊNCIA DE CAMPO

Nesta seção será evidenciada a experiência de campo com o Projeto PILACAS. Nele foram realizados desde a pesquisa de compra dos equipamentos, seu comissionamento e operação da máquina e dos instrumentos com o intuito de levantar a curva de potência de aerogeradores em um laboratório de campo aberto. Os procedimentos foram baseados nas normas IEC 61400.

3.1 O PROJETO PILACAS

A confiabilidade dos aerogeradores de pequeno porte é um ponto muito importante para o adequado desenvolvimento deste mercado. A certificação dos aerogeradores de pequeno porte é interesse tanto dos clientes como dos próprios fabricantes. Para o cliente a certificação representa uma garantia de confiabilidade do produto que estará sendo adquirido e para os fabricantes a certificação contribui para minimizar os riscos de falhas e agregar um forte argumento de venda (PILACAS, 2014; SWCC, 2016). O processo de certificação de aerogeradores de pequeno porte pode ser sumarizado pela Figura 47.

Figura 47. Ensaios em APPs.



Fonte: Adaptado de (ALÉ, 2012).

O crescimento da economia brasileira tende a um aumento no consumo de energia elétrica no país. Segundo a publicação periódica da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), até 2024 o

consumo de energia elétrica nacional será de 791 TWh, isto equivale a um aumento de 4,0% ao ano (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016). Claramente, para manter este modelo de sociedade, deve-se produzir mais eletricidade, o que pode ser realizado por meio das tecnologias convencionais ou maduras, com escalas e processos fortemente limitados pelas condicionantes ambientais que são cada vez mais restritivas, e/ou complementando a demanda e desenvolvendo tecnologias com as chamadas fontes energéticas alternativas renováveis.

Adicionalmente, os consumidores residenciais de energia elétrica desde 2012, de acordo com a Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, atualizada para a REN nº 687/2015, podem tornar-se credores das distribuidoras de eletricidade (ANEEL, 2015). Para isso, eles deverão produzir sua própria energia elétrica utilizando painéis solares ou aerogeradores de pequeno porte, por exemplo.

Diante dessa constatação, e consciente do papel de que compete a ações das academias, a capacidade de previsão de situações mediatas de risco e de seu papel de agentes indutores de mudanças da sociedade, o CNPq divulgou o edital MCT/CNPq FNDCT Nº 05/2010, onde as instituições UFPE e IFPE – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – lançaram um projeto de laboratório piloto para testes de sistemas completos de aerogeradores de pequeno porte.

O Projeto intitulado Piloto de um Laboratório em Campo Aberto para Certificação de Aerogeradores de Pequeno Porte (PILACAS) foi aprovado pelo Edital MCT/CNPq FNDCT Nº 05/2010 e seu período de vigência foi de outubro de 2010 até agosto de 2014.

Os objetivos do Projeto foram:

- Implantar um projeto piloto de uma estrutura laboratorial de campo aberto para subsidiar o desenvolvimento de um processo nacional de certificação de sistemas completos de aerogeradores de pequeno porte; e
- Capacitar recursos humanos (engenheiros, mestres e estudantes de engenharia e ensino técnico) na experiência prática de instalar, operar e manter laboratório de tecnologia na

fronteira do conhecimento mundial para atender a demanda crescente em sistemas eólicos.

O Projeto teve seus objetivos cumpridos e contou com uma equipe formada por professores, alunos de graduação, engenheiros e mestres.

O PILACAS foi montado nas dependências do IFPE *Campus Ipojuca*. O instituto localiza-se na cidade de Ipojuca-PE, rodovia PE 60, km 14, e sua coordenada geográfica é 08°23,125' S e 35°02,367' O. O local do laboratório está a uma cota de aproximadamente 20 metros com relação ao nível do solo local e a uma distância de cerca de 10 km do mar, o que o torna um local com condições de vento potencialmente favoráveis para a construção de um laboratório para testes de aerogeradores. Além disso, o fato de estar localizado nas dependências do IFPE garante o atendimento à questão de proteção ao patrimônio, minimizando a possibilidade de ações de vandalismo, muito comum em laboratórios de campo. Por outro lado, o laboratório montado em um Instituto Federal de Educação e Tecnologias possibilita o seu potencial de pesquisas para a utilização em aulas práticas, no processo de formação e capacitação de pessoal (PILACAS, 2014).

A montagem do PILACAS foi realizada com base nas normas ABNT NBR IEC 61400-12-1:2012 seguindo todos os seus procedimentos para especificação de equipamentos, testes, montagem e instalação destes, assim como os procedimentos de montagem e instalação das torres meteorológicas. Também se utilizou da metodologia prevista na norma para o tratamento e processamento dos dados (PILACAS, 2014).

Para informações detalhadas sobre todo o Projeto, como fotos, vídeos e relatórios, acessar <https://www3.ufpe.br/mecfluamb/> e navegar em Projetos, Concluídos, PILACAS.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO PILACAS

A partir do início do Projeto em outubro de 2010, e depois de selecionados os bolsistas, começou-se a realizar pesquisas referente aos equipamentos de medições e estruturais, seguindo a norma ABNT NBR IEC 61400-12-1:2012.

A equipe do Projeto analisou a área, onde posteriormente foi implantado o laboratório, para avaliar se seria necessário o procedimento de ajuste de terreno (*Site Calibration Procedure*) (ABNT, 2012). Segundo a avaliação, seria necessário realizar tal procedimento e assim foi realizado.

Para que esse procedimento fosse realizado foi necessário um período de estudos referentes à testes/programação dos equipamentos adquiridos (REZENDE NETO e ARAÚJO, 2012) bem como projeto e instalação de duas torres meteorológicas (estes últimos realizados por empresa especializada). As torres têm uma altura de 40 m em relação ao solo e 60 m em relação ao nível médio do mar.

O *Site Calibration Procedure* quantifica e potencialmente reduz os efeitos do terreno e obstáculos na medição da curva de potência. A chave do procedimento é a elaboração de uma tabela de correção de fluxo e a estimativa de suas incertezas. Neste procedimento são utilizados dois anemômetros, um em cada torre meteorológica, e é realizada uma temporada de medidas suficientemente longa para que possa ser adquirida a quantidade de dados para o cálculo dos fatores de correção de fluxo. O procedimento teve duração de 1 ano e 5 meses (07/10/2011 à 20/02/2012), tempo considerado suficiente para realização da correção de fluxo (PILACAS, 2014).

Verificada as condições do terreno em relação ao fluxo, no qual foi aprovado, passou então à etapa de instalação da máquina teste para aferir sua curva de potência, objeto principal do Projeto.

O procedimento de preparação para teste de desempenho (*Preparation Performance Test*) consiste na avaliação do local do laboratório piloto. Esta etapa é fundamentada na análise do local sob todos os aspectos que possam interferir no escoamento do vento, como variações na topografia e cobertura do terreno, presença de outros aerogeradores e outros obstáculos (construções, árvores de grande porte, etc). Desta forma são analisados os vários potenciais posicionamentos das torres de forma que estas possam melhor capturar o comportamento do campo de vento uniforme no local, Figura 48 (PILACAS, 2014).

Figura 48. Disposição das torres no local.



Fonte: Adaptado de (GOOGLE MAPS, 2013).

As torres, inicialmente meteorológicas, não devem ser posicionadas muito distantes uma da outra (pois dessa forma pode aumentar os erros de correção de fluxo) e nem muito próximas (para não causar perturbações de vento, que venham interferir nas medições). A distância entre as duas torres deve ser uma função do diâmetro do aerogerador em teste. A torre meteorológica deve estar posicionada a uma distância de 2 a 4 vezes o diâmetro do aerogerador. A distância recomendada pela IEC é de 2,5 vezes o diâmetro. Neste caso, a distância entre as duas torres foi estipulada no valor de 3,25 diâmetros. Foi escolhida uma distância maior do que a recomendada para que futuramente pudessem ser utilizados aerogeradores com maiores diâmetros sem necessitar mudar a posição das torres, Figura 49 (PILACAS, 2014).

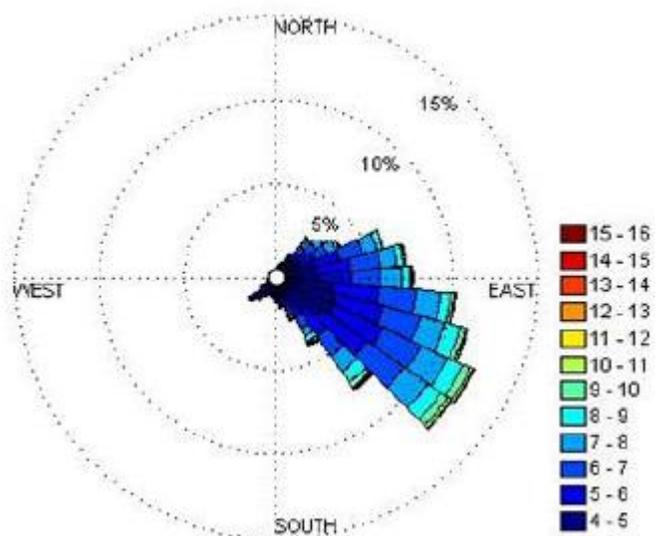
Figura 49. Disposição das torres instaladas no laboratório de campo aberto.



Fonte: (PILACAS, 2014).

O posicionamento e a distância entre as torres são de fundamental importância para a medição da curva de potência do aerogerador em teste. Para que apenas as medições de “vento não perturbado” sejam utilizadas durante o período de teste, é realizado um processo de exclusão de dados. Os dados excluídos serão uma função da distância entre os dois mastros (aerogerador em teste e torre meteorológica) e seu posicionamento geográfico. Os trabalhos de Rezende Neto e Araújo (2012) e Alvarez (2013), que serão descritos adiante, mostraram que o vento predominante na região é na direção Sudeste, Figura 50 (PILACAS, 2014).

Figura 50. Rosa dos ventos do local no ano de 2012.



Fonte: ALVAREZ (2013); PILACAS (2014) e (MORAES e ARAÚJO, 2014).

Face às condições ambientais dominantes na região do laboratório piloto (proximidade ao mar), o período de 19 meses foi suficiente para se verificar que as torres não estavam mais em condições operacionais devido à degradação por oxidação, principalmente para se instalar a máquina teste, podendo-se prever um colapso das torres o que comprometeria de forma significativa o Projeto, Figura 51 (PILACAS, 2014).

Figura 51. Torre oxidada.



Fonte: PILACAS (2014).

Em face dessa situação, tornou-se imperiosa a retirada de todos os instrumentos e desmonte das torres, atividade que não estava prevista originalmente no cronograma do Projeto. Com isso, tornou-se necessária a contratação de novos serviços que envolveram atividades como: remoção de instrumentos/sensores; desmonte das duas torres e transporte; recuperação dos módulos (remoção de ferrugem, troca e galvanização dos triângulos, pintura com base de zinco e pintura de sinalização diurna); transporte e remontagem das duas torres (troca de clips e esticadores); instalação de instrumentos/sensores; e instalação do aerogerador (PILACAS, 2014).

O tipo de atividade técnica envolvida neste serviço é ainda de oferta relativamente escassa no Brasil, principalmente no NE, região onde há atualmente uma grande demanda dos empreendedores para a instalação de torres para prospecção de jazidas eólicas e torres de transmissão, fazendo com que as poucas empresas prestadoras desse tipo de serviço estejam sempre com seus equipamentos e pessoal ocupados. Após a retirada dos instrumentos, verificou-se também que os mesmos durante essa primeira temporada de medições ficaram em estado de não funcionamento ou descalibrados devido ao tempo natural de desgaste dos instrumentos e às ações das intempéries locais. O período total utilizado para a aquisição de novos instrumentos de

medições eólicas, desmontagem, transporte, tratamento superficial, pintura e remontagem das torres e dos instrumentos eólicos, demorou cerca de 5 meses (Maio-Out/2013) (PILACAS, 2014).

Em Nov/2013, instalou-se também na segunda torre a máquina teste com o seu sistema elétrico (banco de resistores; freio elétrico; etc.). A partir dos testes e verificações em campo do funcionamento desse sistema elétrico, foi possível se identificar a topologia ideal dos transdutores de tensão, corrente e frequência. Após a aquisição por importação desses transdutores, teve-se que verificar sua integração prática com o restante do sistema elétrico e se programar o *datalogger* para receber os sinais desses novos instrumentos, Figura 52 (PILACAS, 2014).

Figura 52. Máquina teste em campo.



Fonte: (PILACAS, 2014).

Face às dificuldades inerentes à curva de aprendizado especificamente nessa última tarefa de integração dos sistemas elétricos, os transdutores só puderam ser instalados e estarem em condições de pleno funcionamento em 01 de Jul/2014. A partir desta data, os dados necessários para o levantamento da curva de potência da máquina teste escolhida foram registrados, armazenados e tratados (PILACAS, 2014).

3.3 TRABALHOS REALIZADOS

O primeiro fruto desse Projeto foi o trabalho de Rezende Neto e Araújo (2012). Ele consistiu no desenvolvimento de um algoritmo baseado na norma que possibilita a extração de informações fundamentais para a avaliação do potencial eólico de qualquer local com série de ventos disponíveis. A ferramenta desenvolvida quando usada em conjunto com séries de dados de vento fornece como resultados características que se mostraram compatíveis com os exemplos disponíveis no normativo da IEC. A possibilidade de otimização e facilidade de utilização são as principais vantagens de uma ferramenta criada para o MatLab®, gerando a possibilidade de utilização do algoritmo em estudos diversos relacionados à área de eólica (REZENDE NETO e ARAÚJO, 2012).

Alvarez, Araújo *et al.* (2012) em seu artigo para congresso, como parte do seu trabalho posterior, apresentou uma concepção de ferramenta computacional desenvolvida em um *software* estatístico livre. A ferramenta foi projetada com o intuito de processar, analisar as características e armazenar dados de ventos adquiridos com instrumentação dedicada para fins de maximizar o aproveitamento da energia eólica para a geração de eletricidade (ALVAREZ, ARAÚJO, *et al.*, 2012).

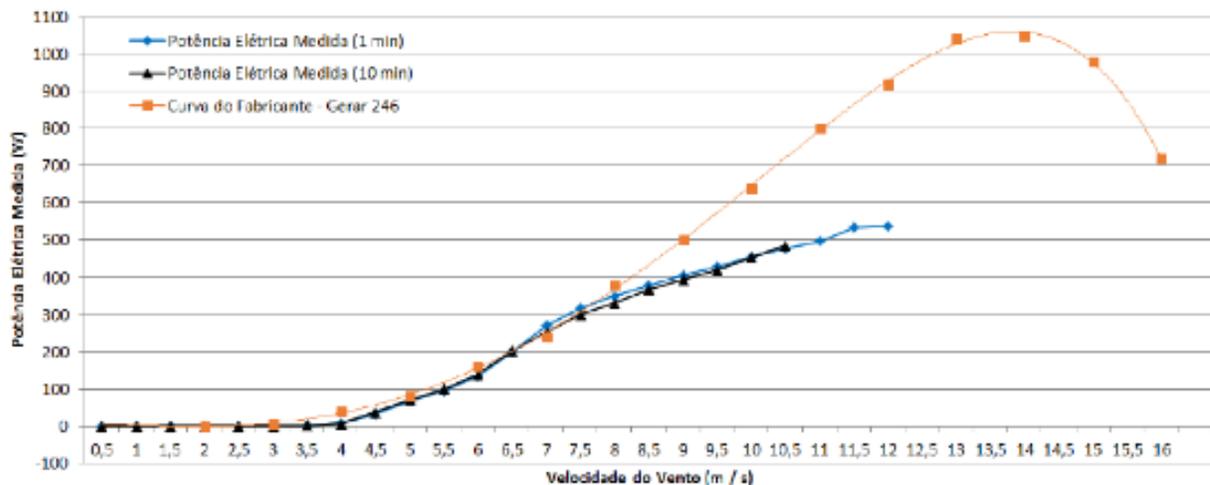
Alvarez (2013), em sua dissertação de mestrado, desenvolveu um sistema computacional, utilizando um banco de dados integrado a um *software* estatístico, tendo como finalidade o armazenamento, gerenciamento e análise de dados eólicos. Foram desenvolvidos os processos de análise estatística, com suas respectivas gerações de gráficos utilizando um *software* estatístico livre denominado R (ALVAREZ, 2013).

Jaouen (2013) realizou simulações de vento na colina de Ipojuca com os dados do PILACAS. A primeira simulação foi sobre um aerofólio (perfil S814). Esta simulação permitiu conhecer alguma característica deste perfil (por exemplo: coeficiente de arrasto, coeficiente de elevação e turbulência). A segunda parte foi a simulação de fluxo na colina de Ipojuca usando vários métodos (JAOUEN, 2013).

Moraes e Araújo (2014) realizaram um trabalho de iniciação científica similar ao de Alvarez (2013), porém utilizando outra metodologia e com o uso do MatLab®. O trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de ferramentas computacionais para o processamento de dados eólicos provenientes do projeto PILACAS. Estas ferramentas foram integradas a este Projeto, sendo parte fundamental para a sua realização (MORAES e ARAÚJO, 2014).

Da Silva (2015), em seu trabalho de conclusão de curso (TCC), levantou experimentalmente a curva de potência elétrica de um aerogerador de pequeno porte com base na metodologia da norma ABNT NBR IEC 61400-12-1. Neste trabalho utilizou-se o banco de dados eólico disponibilizado pelo projeto PILACAS. Para o tratamento destes dados empregou-se a ferramenta *Visual Basic for Application* (VBA) do Excel®. Os resultados mostraram uma diferença entre a curva de potência medida e a curva do fabricante do equipamento, Figura 53. Notou-se que houve uma divergência entre as curvas a partir da velocidade de 7 m/s, onde se verificou a máxima eficiência de conversão de potência eólica disponível em potência elétrica. Um dos fatos que contribuíram para essa diferença é que a curva levantada pelo fabricante é desenvolvida em bancada, isto é, não são consideradas as perdas aerodinâmicas do sistema rotor/fluxo já que um motor elétrico é responsável pelo giro do gerador elétrico (DA SILVA, 2015). Além disso, os dados utilizados para esse experimento foram colhidos de 01/Julho a 15/Ago de 2014, sendo um intervalo muito pequeno.

Figura 53. Curva de potência do aerogerador ensaiado.



Fonte: (DA SILVA, 2015).

Rocha (2015) procurou investigar os procedimentos metodológicos que se pode utilizar para avaliar a vibração em uma torre de um aerogerador de pequeno porte. Não obstante, quantificou as vibrações existentes nas torres buscando identificar suas causas de modo a mitigar os efeitos decorrentes deste processo. Além disso, estudou a viabilidade da utilização de pequenos sensores digitais para análise de problemas complexos visando a redução de custos dos estudos da causa da falha e propôs, através dos resultados, meios de se solucionar a causa apresentada pelo sistema (Torre + Aerogerador) na torre do Projeto PILACAS que continha o aerogerador (ROCHA, 2015).

Observe que todos os trabalhos acima citados utilizaram dados do PILACAS. De Out/2011 até Maio/2013 e o período entre 01/Julho e 15/Agosto de 2014, formou-se um banco de dados (BD) eólicos que permitiu o desenvolvimento desses trabalhos. Esse BD registrado e arquivado é muito importante também para trabalhos futuros que necessitem de dados eólicos, pois foram registrados e armazenados em uma frequência de 1 Hz, podendo ser utilizados em uma gama de estudos.

O arremate final do Projeto foi que se formou uma equipe especializada no comissionamento e operação de instrumentos e máquinas para área de ensaio de aerogeradores de pequeno porte, tendo formado um banco de dados eólicos valioso para estudos atuais e futuros. Verificou-se também que a velocidade média anual do local era de apenas 4,58 m/s a 60 m de altura em relação ao nível médio do mar (40 m ao nível do solo) (ALVAREZ, 2013, p. 52). Foi avaliada apenas a curva de potência do aerogerador baseada na ABNT NBR IEC 61400-12-1:2012 e os dados para tal análise não foram suficientes para uma campanha completa de dados elétricos como pode ser observado em da Silva (2015). A velocidade máxima do local foi de 12,46 m/s com o fator de forma de Weibull $k=2,57$ no período medido (cerca de dois anos) (ALVAREZ, 2013, p. 52), o que não atende aos requisitos para ensaios completos de aerogeradores de pequeno porte segundo a IEC 61400-2. Porém, segundo a ABNT NBR IEC 61400-12-1 no item 7, a curva de potência pode ser extrapolada se não houver dados medidos suficientes. Além do que, provavelmente, o ensaio de duração pode ser realizado, obedecendo a IEC 61400-2 como descrito no APÊNDICE C, desde que seja avaliado o critério 5. Diante disso, fica evidente que a área do laboratório de campo não

é favorável ao ensaio completo de aerogeradores, mas se pode realizar alguns ensaios como o de **desempenho de potência** utilizando dados extrapolados, o de **duração**, retirando-se o critério 5, e o de **segurança e função**. Não obstante, o Projeto foi de grande valor científico, pois, ainda gera possibilidades de análise dos dados armazenados além de formação de pessoal qualificado no setor eólico.

3.4 RESUMO DO CAPÍTULO 3

Este **Capítulo 3** evidenciou o desenvolvimento do Projeto PILACAS com a formação de recurso humano especializado, análises técnicas de banco de dados bem como desenvolvimento de ferramentas para processamento dos mesmos, desenvolvimento de planos de estudo e instalação, comissionamento e operação de equipamentos de medição meteorológica e aerogerador. Não obstante, mostrou também os trabalhos desenvolvidos com os dados do Projeto. Mostrou também que a área de ensaios não realiza ensaios completos de APPs, porém podem ser realizados ensaios de desempenho de potência, de duração e o de segurança e função.

Ao consultar o **Capítulo 3**, o leitor terá uma ideia geral de como é realizado um ensaio de desempenho de potência de um aerogerador de pequeno porte e o necessário para realizá-lo, bem como as dificuldades encontradas no desenvolvimento do Projeto PILACAS.

É importante destacar que o autor deste trabalho participou do Projeto PILACAS (2010-14) onde foi aprendido muito sobre normas, instalação, comissionamento e operação e manutenção de um laboratório para certificação de aerogeradores. Isso enriqueceu o conhecimento de toda a equipe que trabalhou nesse Projeto pioneiro no país no setor eólico.

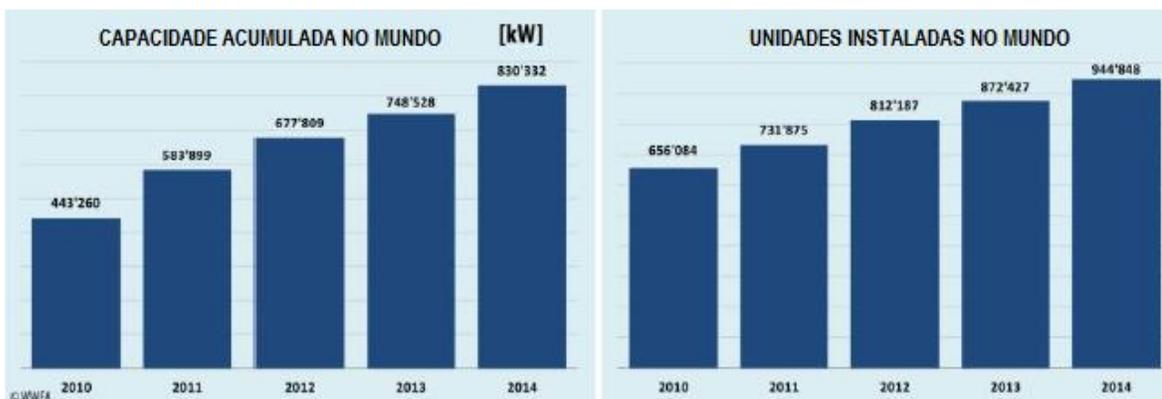
4 ANÁLISE DE MERCADO E DAS POLÍTICAS DE INCENTIVO

Este tópico está baseado nos relatórios anuais mais recentes divulgados pela *World Wind Energy Association* (WWEA), além de pesquisas relacionadas ao mercado nacional e internacional. Serão analisadas e sintetizadas as informações contidas nesses relatórios de modo a evidenciar o mercado atual (2016) e futuro de APPs com o intuito de averiguar suas necessidades de uma área de ensaios e desenvolvimento aqui no Brasil, objetivando a constante evolução tecnológica para as suas máquinas, bem como a certificação das mesmas.

4.1 MERCADO DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE: ATUAL E PROSPECTIVO

O mercado mundial de APPs estabilizou depois da crise em 2013 tanto em termos de unidades vendidas quanto de capacidade instalada (Figura 54). Os dois maiores mercados, China e EUA, têm tido crescimentos similares em termos de novas unidades como em 2013, 10% e 1% respectivamente. O país que mais cresceu foi o Reino Unido (RU), com um aumento de 19% em termos de unidades em relação a 2% de 2013. Ao final de 2014, havia um total de pelo menos 945.000 pequenos aerogeradores instalados em todo o mundo. Isso representa um aumento de 8,3% comparado com o ano anterior, quando havia 872.000 unidades (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2016). Nota-se, pela Figura 54, que enquanto a capacidade instalada teve um acréscimo de 87% em quatro anos, o número de aerogeradores cresceu 44%. Isso significa uma evolução na tecnologia eólica com os aerogeradores aumentando a sua potência de placa.

Figura 54. O gráfico da esquerda mostra a capacidade acumulada total global. O gráfico da direita mostra a quantidade de aerogeradores instalados no mundo.

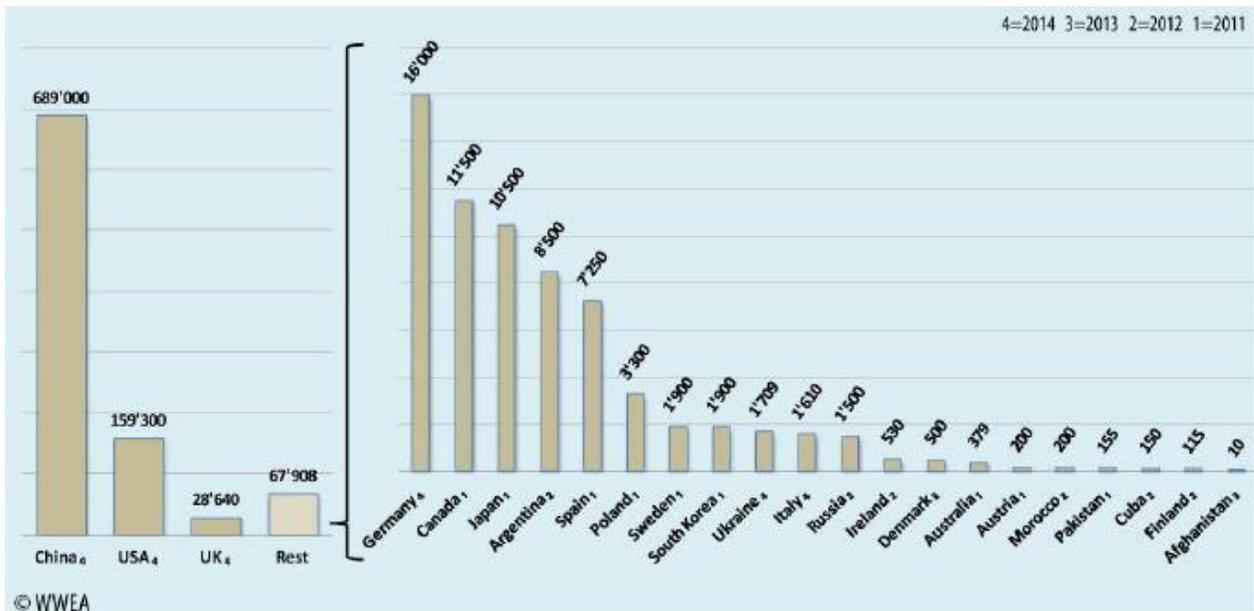


Fonte: Adaptado de (WWEA, 2016).

A China continua liderando o mercado em termos de unidades instaladas. Foram cerca de 64.000 unidades adicionadas em 2014, 9.000 a mais do que em 2013, alcançando 689.000 unidades instaladas até o final de 2014. O mercado chinês representa 72% do mercado mundial em termos de unidades instaladas, um mercado que começou no começo da década de 1980 (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2016). Nos EUA, o número de unidades instaladas caiu para 1.600 em 2014 das 2.700 em 2013. Com um total de 159.300 unidades instaladas, os EUA é o segundo maior mercado mundial (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2016).

O mercado de pequenos aerogeradores no Reino Unido viu um aumento no número de instalações em 2014 apesar das mudanças no plano *Feed-in Tariff* (FiT) introduzido em novembro de 2012. Foram instalados 2.237 aerogeradores em 2014, um crescimento significativo comparado com o ano anterior que só forma instaladas 500 unidades. Um fato interessante é que, para cada aerogerador instalado no Reino Unido, um é exportado. Cerca de 2.614 unidades saíram do país para mercados como Europa, EUA e Ásia, Figura 55 (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2016).

Figura 55. Capacidade total acumulada de unidades por país.

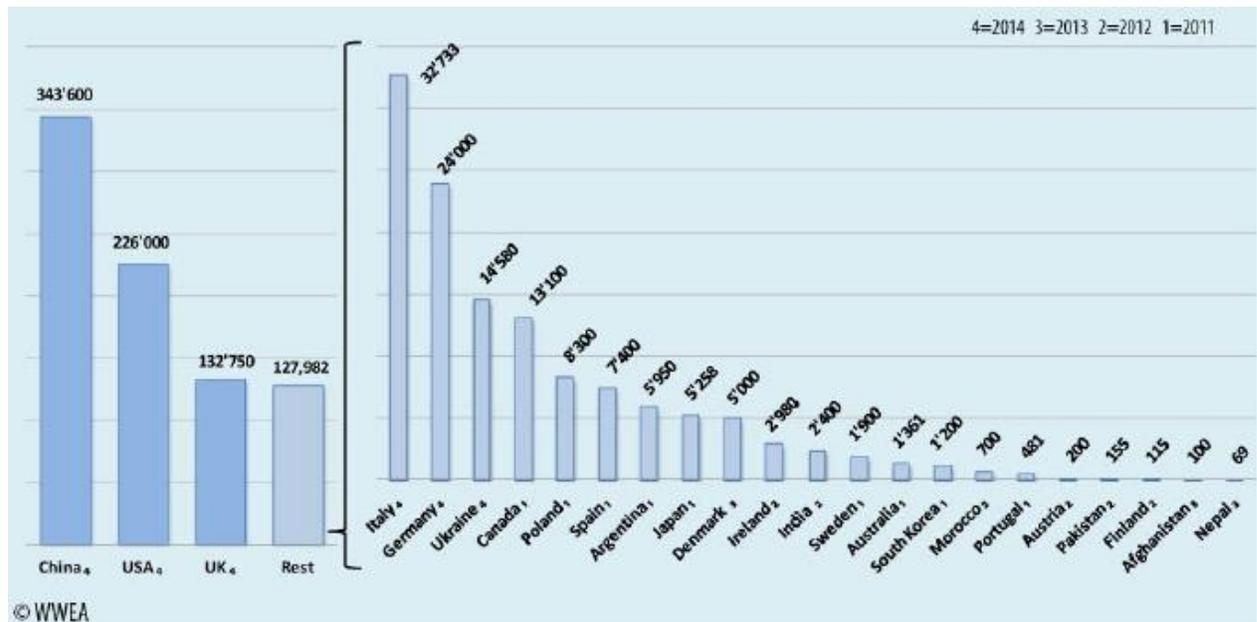


Fonte: (WWEA, 2016).

A explosão do mercado nos últimos anos ficou com a Itália, crescendo 71% e alcançando 1.610 unidades até o final de 2014. Alemanha, Canadá, Japão e Argentina são todos mercados de médio porte com um número total de pequenos aerogeradores entre 8.500 e 16.000 unidades (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2016).

O recorde mundial de capacidade instalada de pequenos aerogeradores foi atingido em 2014 com mais de 830 MW. Isso representa um acréscimo de quase 11% comparado com 2013 quando 749 MW estavam registrados. Os anos anteriores tiveram crescimentos de 10,4% (2013) e 16,1% (2012), mostrando uma forte recuperação do mercado mundial para APPs (Figura 56). Em termos de capacidade instalada a China conta com 41% da capacidade mundial, os EUA com 30% e o Reino Unido com 15% (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2016).

Figura 56. Capacidade total acumulada em kW por país.



Fonte: (WWEA, 2016).

O mercado de APPs nos EUA cresceu apenas 3,7 MW em 2014, um decréscimo de 34% comparado com 2013 e de 80% em relação à 2012. Esse mercado somou U\$ 20 mi em investimentos em 2014, \$ 16 mi a menos que em 2013 (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2016).

No Reino Unido e Itália o mercado de aerogeradores acima de 20 kW cresceu muito em 2014. No Reino Unido, a capacidade instalada de aerogeradores entre 15 e 100 kW cresceu 75,6%. Na Itália, potências entre 20 e 60 kW, 85,4 % (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2016). Em ambos os países, o FiT foi o impulso para o setor, o que pode incentivar ainda mais o Brasil em termos de políticas regulatórias (GIANNINI, DUTRA e GUEDES, 2013). Entretanto, a estrutura do FiT beneficiou aerogeradores com maiores potências (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2016).

Mundialmente, um aumento no tamanho desses pequenos aerogeradores pode ser observado. Em 2010, a média instalada tinha a potência de 0,66 kW; em 2011, 0,77 kW; em 2012 0,84 kW; 2013, 0,85 kW; e em 2014 já havia alcançado 0,87 kW em média. Enquanto que a média na China era de 0,5 kW, pequenos aerogeradores nos EUA tinham uma capacidade média de 1,4 kW e no Reino Unido 4,7 kW. É importante salientar o mercado de aerogeradores de médio porte (acima de 100 kW) aumentou rapidamente no Reino Unido entre 2013 e 2014 (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2016).

Cinco países possuem mais de 50% dos fabricantes mundiais. São eles: Canadá; China; Alemanha; Reino Unido e EUA. Até o final de 2011, haviam mais de 330 fabricantes de aerogeradores de pequeno porte no mundo e uma estimativa de mais de 300 empresas de fornecimento de peças, tecnologia, consultoria e serviços. No Brasil existem ao menos três fabricantes de aerogeradores de pequeno porte (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2016).

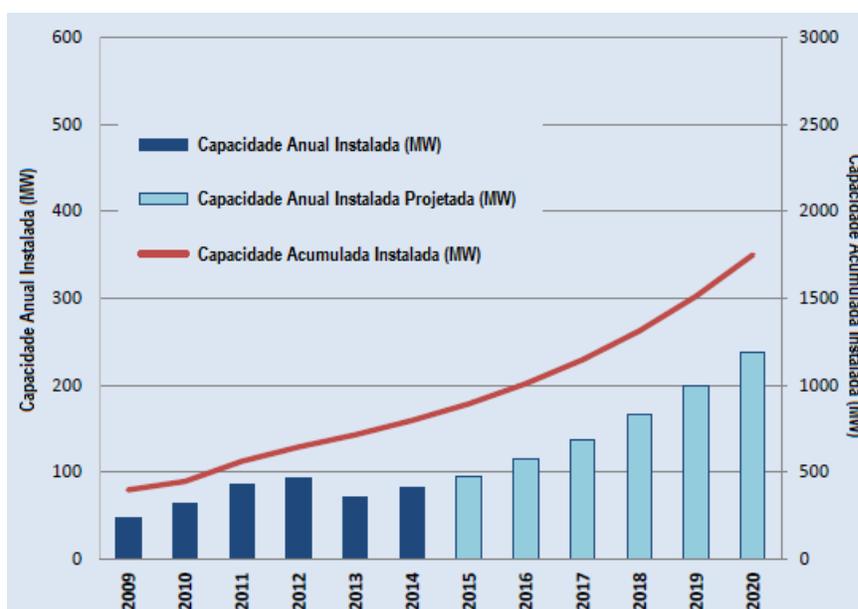
Baseada na distribuição mundial desses fabricantes, a produção de pequenos aerogeradores está concentrada em algumas regiões: na China; América do Norte e em muitos países da Europa. Países em desenvolvimento continuam fabricando essa tecnologia em menor escala. Mais de 120 dos novos fabricantes mundiais começaram entre 2000 e 2010. A China sozinha fabrica mais de 180.000 unidades por ano desde 2011 (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2016).

Como previsto em 2015, o mercado global de pequenos aerogeradores, que diminuiu em 2014, voltando a crescer novamente em 2015, ao menos em termos de capacidade instalada, principalmente devido ao fato do aumento da capacidade desses aerogeradores instalados na China e Europa. Pelo menos 115 MW de acréscimo na capacidade instalada é esperada para 2016.

Dentro desse contexto, alguns países e a comunidade internacional de pequenos aerogeradores estão dispostos a estabelecer padrões mais rigorosos e políticas para regular o mercado e dar apoio a investimentos (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2016).

A previsão é de que o mercado tenha uma taxa de crescimento de 20% de 2015 a 2020. A indústria está prevendo um acréscimo de 240 MW de nova capacidade instalada anualmente em 2020 e alcançar uma capacidade acumulada em torno de 1,75 GW, Figura 57 (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2016).

Figura 57. Previsão do mercado mundial para a capacidade instalada de APPs.



Fonte: Adaptado de (WWEA, 2016).

Segundo a GlobalData® a capacidade acumulada de pequenos aerogeradores no mundo alcançará os 4,8 GW em 2025. A previsão é de que a China lidere esse avanço com 1,8 GW, seguida do Reino Unido com 1 GW (GLOBALDATA, 2015).

4.1.1 Brasil

Em 2012 a ANEEL lançou a Resolução Normativa nº 482 onde estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências (ANEEL, 2012).

Motivados por essa resolução, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) realizou no mesmo ano o “*Workshop de geração eólica distribuída*”, onde reuniu vários interessados no tema para apresentações e discussão desse mercado.

Pereira, Montezano e Dutra (2015) realizaram dois trabalhos de análise sobre o mercado dos aerogeradores de pequeno porte no Brasil. Um relativo à percepção dos potenciais consumidores (PEREIRA, MONTEZANO e DUTRA, 2015) e outro sobre a percepção dos produtores (DUTRA, PEREIRA e MONTEZANO, 2015). As informações contidas nesses trabalhos são oriundas da pesquisa realizada através de questionário *online* que pode ser acessado em CRESESB (2015). Esse estudo foi desenvolvido pelo Cepel solicitado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) para avaliação de mercado dos aerogeradores de pequeno porte no país, cujo objetivo é de avaliar a utilização da tecnologia como uma opção energética para os consumidores interessados em adotar o Sistema de Compensação Energética definido na REN nº 482/2012, atualizada para a REN nº 687/2015 (CRESESB, 2015). A primeira etapa da pesquisa durou 35 dias em 2014 para preenchimento do questionário. A segunda etapa durou um ano após a primeira etapa, ou seja, até dezembro de 2015 (PEREIRA, MONTEZANO e DUTRA, 2015).

O primeiro trabalho apresentou e discutiu a percepção do potencial consumidor sobre APP, identificando os determinantes que influenciam o processo de decisão de compra da tecnologia. Os resultados apontaram, na primeira etapa, que 74% dos pesquisados têm interesse em comprar um APP (PEREIRA, MONTEZANO e DUTRA, 2015). Os principais motivadores de compra dessa tecnologia estão mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Motivação para compra dos APPs.

Motivação	%
Redução na conta de energia elétrica	54,0
Redução de emissão de gases de efeito estufa	18,0
Preço	8,0
Fácil instalação e manutenção	4,0
Independência energética	4,0
Teste experimental para centro de pesquisa	2,0
Geração distribuída	2,0
Backup da rede básica	2,0
Pesquisa	2,0
Estratégico	2,0
Interesse pessoal	2,0

Fonte: (PEREIRA, MONTEZANO e DUTRA, 2015)

Outro fato interessante da pesquisa é o quanto o consumidor está disposto a investir na tecnologia. A Tabela 7 mostra a disposição de investimento.

Tabela 7. Disposição de investimento.

Investimento	%
Até R\$ 10.000	61,2
Acima de R\$ 10.000 até R\$15.000	8,2
Acima de R\$ 15.000 até R\$30.000	8,2
Acima de R\$ 30.000 até R\$60.000	2,0
Acima de R\$ 60.000 até R\$100.000	0,0
Acima de R\$ 100.000 até R\$1.000.000	2,0
Não sei/Não quero responder	18,4

Fonte: (PEREIRA, MONTEZANO e DUTRA, 2015)

No segundo trabalho, foi apresentado e discutido a percepção do fabricante, identificando a estrutura de produção em 2015, os investimentos realizados e as perspectivas de curto-médio prazo do segmento (DUTRA, PEREIRA e MONTEZANO, 2015).

Foram analisadas cinco empresas denominadas A, B, C, D e E. Os fabricantes e revendedores de APPs no Brasil têm pouco tempo de atuação no mercado, exceto por uma empresa que possui 12 anos de experiência, as demais têm no máximo cinco anos (DUTRA, PEREIRA e MONTEZANO, 2015).

A faixa de potência das máquinas fica entre 350 W e 100 kW, sendo a maior parte situada entre 1 e 5 kW, assim como cerca de 75% dos APPs disponíveis comercialmente no mundo (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2016). Os modelos fabricados no Brasil são, em sua grande maioria, de eixo horizontal tendo apenas um modelo de eixo vertical. O fabricante desse único modelo de 1,5 kW informou que o seu desenvolvimento foi motivado pela experiência obtida com a fabricação e comercialização dos seus modelos de eixo horizontal que se mostraram pouco apropriados para uso em ambiente urbano devido ao alto grau de turbulência intrínseco ao ambiente e o nível de ruído gerado, características que se opõem aos de eixo vertical (DUTRA, PEREIRA e MONTEZANO, 2015).

Em relação aos principais compradores de APPs, verificou-se que são consumidores residenciais, fazendas, empresas/fábricas/comércio e universidades. Apenas um dos fabricantes apontou o

setor de telecomunicações como um importante nicho para seus negócios, como apresentado na Tabela 8 (DUTRA, PEREIRA e MONTEZANO, 2015).

Tabela 8. Principais compradores.

Principal comprador	Empresas				
	A	B	C	D	E
Consumidor residencial (urbano)			X	X	X
Fazendas			X	X	X
Empresas/Fábricas/Comércio	X		X		X
Consultores					
Revendedor					
Universidade	X				X
Telecomunicações	X				
Não sabem/não responderam		X			

Fonte: (DUTRA, PEREIRA e MONTEZANO, 2015).

Ainda em relação à produção, foi questionado se as empresas também comercializavam tecnologias de geração de energia elétrica, além da eólica, e 40% afirmaram que comercializam apenas produtos relacionados a aerogeradores, Tabela 9. Segundo Dutra, Pereira e Montezano (2015), essa diversificação pela maioria dos fabricantes em comercializar ao menos um produto além do aerogerador sugere que a comercialização exclusiva de APPs não produz renda suficiente para manutenção das suas atividades.

Tabela 9. Outras tecnologias oferecidas pelas empresas.

Alternativa oferecida	Empresas				
	A	B	C	D	E
Solar fotovoltaico		X			X
MCH/PCH		X		X	
Gerador de combustão		X			
Hidrocinética					
Biodigestor					X
Solar térmico					X

Fonte: (DUTRA, PEREIRA e MONTEZANO, 2015).

Em relação aos investimentos no setor, o resultado da pesquisa destacou que 80% das empresas realizaram investimentos com recursos próprios e 60% recursos de instituição de fomento à pesquisa, Tabela 10. Ainda segundo Dutra, Pereira e Montezano (2015):

“Estas duas fontes de financiamento mostram como o setor produtivo de APPs no Brasil é incipiente pois foram aplicados montantes significativos na expansão da produção e melhoria do produto. As perspectivas de novos investimentos mostram uma visão otimista do futuro que, neste caso, superam os montantes investidos nos últimos três anos. Estes novos investimentos seguem a tendência de expansão e melhoria da produção, incluindo também a diversificação da produção.”

Tabela 10. Investimentos em APPs no setor produtivo.

Ação de investimento	Aplicações atuais					Aplicações futuras				
	Empresas					Empresas				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Ampliação da produção	X		X	X		X	X	X	X	
Diversificação da produção				X		X	X	X	X	
Aperfeiçoamento do produto			X		X	X		X	X	X
Treinamento				X		X			X	X
Logística										X
Marketing				X						X
Pós-venda			X			X		X		
Equipamento	X									
Tranferência de tecnologia		X				X				
Aperfeiçoamento do processo produtivo						X				

Fonte: (DUTRA, PEREIRA e MONTEZANO, 2015).

Em relação à REN nº 482/2012, esta foi muito criticada pelos participantes da pesquisa. Segundo um dos entrevistados, a resolução, embora positiva, não é suficiente para suportar uma expansão do segmento de APPs no país. Esta afirmação está amparada pelas linhas de ações sugeridas pelos entrevistados que, em sua maioria, identificaram a necessidade de incentivos através de financiamento público para o consumidor além de a possibilidade da venda da energia gerada através de um incentivo tipo o *feed-in tariff* (FIT) (DUTRA, PEREIRA e MONTEZANO, 2015).

A pesquisa também mostrou que, apesar do otimismo, a percepção de futuros negócios não é conclusiva, onde 60% dos participantes indicam que o ambiente de negócios para o futuro é desfavorável ou indiferente (DUTRA, PEREIRA e MONTEZANO, 2015).

Vale lembrar que as críticas foram em relação à REN nº 482/2012 e como já foi mencionado, já existe uma atualização dessa resolução que é a REN nº 687/2015, porém foi muito recente em relação à divulgação dos resultados e das críticas. Ainda não se sabe o novo posicionamento dos fabricantes em relação à essa nova REN.

4.1.2 Aprendizado do Brasil sobre o mercado dos EUA

Não obstante, Pereira, da Silva e Freitas (2016) realizaram um estudo sobre o mercado de APPs nos EUA em que objetivou

“...avaliar a presente situação do mercado de energia eólica de pequeno porte dos EUA, identificando as principais características do setor, assim como seus desafios e oportunidades, além de potencial aprendizado para o mercado brasileiro.” (PEREIRA, DA SILVA e FREITAS, 2016)

Na análise, os autores apresentaram uma visão geral do mercado de energia eólica de pequeno porte nos EUA, considerando o potencial mercado, cadeia produtiva, mecanismos de incentivo além da realização de uma pesquisa aos agentes associados ao segmento visando refletir sobre as potenciais lições de aprendizado para a promoção do mercado no Brasil.

Os autores ainda afirmaram que:

“APPs podem ter uma significativa contribuição nos EUA em questões associadas à segurança energética, estratégia tecnológica e de crescimento econômico no longo prazo. Esta tecnologia possui alto potencial de crescimento no mercado americano, considerando a perspectiva de geração distribuída e de tecnologias de baixo custo. Aerogeradores de pequeno porte podem contribuir para a redução da dependência do fornecimento externo de energia, enquanto promove diversos benefícios para a economia doméstica, como por exemplo a ampliação dos postos de trabalho.” (PEREIRA, DA SILVA e FREITAS, 2016)

“O potencial de mercado para aplicações em residência e em pequeno comércio é considerável, no entanto ainda existem diversos desafios a serem enfrentados, associados ao mercado, as políticas de incentivo e ao desenvolvimento tecnológico.

Destaca-se, também, o grande mercado direcionado a fazendas e residências rurais. ”
(PEREIRA, DA SILVA e FREITAS, 2016)

Em relação à cadeia produtiva, Pereira, da Silva e Freitas (2016) perceberam que:

“Uma área que sofrerá profundas transformações e impactará consideravelmente no mercado de energia eólica de pequeno porte refere-se à cadeia produtiva. Existem dois componentes na cadeia produtiva e cada um influenciará potencialmente a taxa de crescimento do mercado. Um dos aspectos está associado que as empresas fabricantes demandarão componentes cada vez mais de “prateleiras” do que componentes de fabricação própria, possibilitando um maior controle sobre a qualidade do produto. Esta questão se torna mais crítica de acordo com o aumento da produção das empresas em escala exponencial. Outro aspecto refere-se ao marketing dos aerogeradores. ”
(PEREIRA, DA SILVA e FREITAS, 2016)

Segundo Pereira, da Silva e Freitas (2016), a indústria continua buscando aperfeiçoar seus processos de fabricação, procurando mitigar os custos, principalmente o de instalação do APP. Diante disso, o governo americano apoia um Projeto denominado *Competitiveness Improvement Project* visando ampliar a liderança dos EUA no mercado interno e externo, com a redução desses custos.

Os autores também apresentaram um estudo realizado pelo NREL em 2012 onde apontam as principais barreiras para implantação de APPs nos EUA. A Tabela 11 traz um resumo.

Tabela 11. Principais barreiras.

Segurança	O efeito de fadiga em ambientes urbanos ou periurbanos é pouco conhecido
Recurso Eólico	Recurso pouco conhecido.
Tecnologia do APP	Pouco conhecimento sobre a tecnologia em ambiente construído (ruído e vibração).
Ambiente construído	Frequência de ressonância pouco conhecida.
Obstáculos não-técnicos	Previsão de retorno de investimento ainda não é claro.

Fonte: (NREL, 2012) apud (PEREIRA, DA SILVA E FREITAS, 2016).

Os autores avaliaram os mecanismos de incentivo à essa tecnologia como segue:

“No tocante aos mecanismos de incentivo, estes não se limitam a tarifa *feed-in*. Existe um conjunto de medidas utilizadas no intuito de promover o mercado, criando um ambiente de negócios favorável à tecnologia, como por exemplo: *net metering*, crédito em impostos, subsídios de capital, entre outras. Segundo DOE (2015b), aerogeradores de pequeno porte é elegível para o *Business Energy Investment Credit* (ITC), onde 30% do custo de investimento do projeto pode ser reembolsado em crédito, tendo um limite de potência até 100 kW, considerando que as turbinas devam atender os requisitos de performance e qualidade estabelecidos pela *American Wind Energy Association Small Wind Turbine* e padrões de segurança da 9.1-2009 (AWEA) ou *The International Electrothnical Commision* 61400-1, 61400- 12 e 61400-11 (IEC). De acordo com USDA (2015), por meio do *Rural Energy for America Program Renewable Energy Systems & Energy Efficiency Improvement Loans & Grants* (REAP) do Departamento de Agricultura e de Desenvolvimento Rural (USDA) é possível obter concessão de empréstimos para até 75% do custo do projeto ou, no máximo de US\$ 25 milhões para projetos de energia renovável. Subsídios são emitidos para até 25% do custo do projeto ou um máximo de US\$ 500.000 para projetos de energia renovável. Uma combinação de empréstimos e subvenções pode cobrir até 75% dos custos totais do projeto. Entre as diversas tecnologias elegíveis para o apoio do USDA se encontra também energia eólica de pequeno porte. O REAP presta assistência financeira aos produtores agrícolas e pequenas empresas rurais para comprar, instalar e construir sistemas de energia renovável, fazer melhorias de eficiência energética para edifícios não residenciais e instalações, utilizar tecnologias renováveis que reduzam consumo de energia, e participe de auditorias energéticas e de ajuda ao desenvolvimento de energias renováveis. “ (PEREIRA, DA SILVA e FREITAS, 2016)

Em relação à pesquisa realizada, Pereira, da Silva e Freitas (2016) identificaram instituições e pessoas chave para contribuir na elaboração do estudo, atingindo 84 respondentes, sendo que desses apenas 15 responderam ao questionário. Os autores perceberam que a situação atual do segmento de APPs nos EUA, 50% consideram o segmento em uma situação restrita devido à competição com os painéis fotovoltaicos (PEREIRA, DA SILVA e FREITAS, 2016). Segue na íntegra uma das respostas:

“O mercado de energia eólica de pequeno porte está buscando um novo caminho. Depois de anos de significativa expansão entre os anos de 2008 e 2012, o mercado está

declinando quando comparado com 2013. Os fabricantes estão buscando novos mercados, particularmente para exportação, além de novos mecanismos de financiamento, tanto quanto um novo aparato regulatório considerando as mudanças climáticas.”

Em relação aos principais desafios atuais e perspectivas aos próximos dez anos, outro respondeu que “...o custo nivelado de energia (LCOE) é ainda muito alto quando comparado ao solar; escassez de financiamento; tempo e custo para licenciamento; redução ou eliminação do apoio federal. Estes permanecerão os principais desafios para o futuro.”

Quanto às questões relacionadas à percepção tecnologia, essas foram positivas, onde cerca de 70% responderam sobre o avanço positivo da certificação, além de aprimoramentos de suas máquinas. Vale ressaltar a necessidade iminente de ajustes, não apenas da redução de custos, mas de melhoramento da confiabilidade dos APPs. Assim respondeu um dos entrevistados relativo à essa questão:

“Os recentes requisitos para certificação para turbinas até 100 kW têm auxiliado na melhoria da qualidade do produto. Pequenos produtores estão tendo sucesso na exportação da tecnologia para diversos países no globo (acima de uma dúzia de países em 2014), denotando o alto nível de qualidade obtido pelos empreendedores.”

Finalmente, são descritas as potenciais lições nas quais o mercado do Brasil poderia realizar baseada na experiência dos EUA, tais como:

- Certificação;
- Necessidade de incentivos financeiros de longo prazo;
- Necessidade de investimentos em P&D.

Segue na íntegra a resposta de um dos entrevistados:

“Sistemas híbridos solar/eólica/diesel possuem aplicações para *off-grid* em regiões remotas ou para torres de telecomunicações (celular). Certificação é um importante instrumento de proteção do consumidor. O consumidor precisa de um instrumento de incentivo, como por exemplo o PURPA Seção 210 (1978) nos EUA, garantindo o direito de conexão na rede e recebimento de pagamento pelo excesso de energia elétrica

disponibilidade na rede. Tais instrumentos são necessários para o desenvolvimento do mercado. ”

Diante do apresentado, Pereira, da Silva e Freitas (2016) concluíram que o apoio do governo dos EUA, juntamente com as empresas, foi muito importante para ampliar o mercado interno de APPs e conseqüentemente a sua matriz elétrica. O intuito é chegar em 2030 com 30 GW de potência instalada, tendo uma receita anual projetada de cerca de US\$ 12 bilhões e empregando cerca de 150.000 pessoas (DWEA, 2015 apud PEREIRA, DA SILVA e FREITAS, 2016).

Para atingir esse objetivo, os principais esforços envidados foram em diagnosticar as barreiras e oportunidades do setor, com o intuito de avaliar as melhores estratégias a serem traçadas em relação às políticas públicas tanto no contexto de aprimoramento da tecnologia quanto a ações voltadas à promoção do ambiente favorável de negócios. Há também questões relacionadas à segurança, recurso eólico, interação com as construções, além de obstáculos não técnicos (PEREIRA, DA SILVA e FREITAS, 2016).

Os autores concluíram também que:

“Políticas públicas, além de específicos incentivos financeiros determinam a velocidade do desenvolvimento de mercado em fontes renováveis de energia. Com o desenvolvimento de mecanismos de incentivos e de políticas públicas aplicadas a energia eólica de pequeno porte nos EUA os resultados se tornaram aparentes, havendo ainda espaço para uma forte ampliação para os próximos 15 anos. ” (PEREIRA, DA SILVA e FREITAS, 2016)

Pereira, da Silva e Freitas (2016) observam que no Brasil ainda é incipiente o mercado de APPs como mostrado em Pereira, Montezano e Dutra (2015).

No arremate final, Pereira, da Silva e Freitas (2016) concluem:

“Buscar a promoção do setor de energia eólica de pequeno no porte no Brasil ainda é um grande desafio, mas lições podem aprendidas com a experiência americana, onde existe uma aproximação entre os centros de pesquisas/Universidades e os

desenvolvedores, criando não apenas um ambiente de diálogo, mas também a constante interação entre a ciência e a indústria. ” (PEREIRA, DA SILVA e FREITAS, 2016)

4.2 ANÁLISE DAS ATUAIS POLÍTICAS DE INCENTIVO NO BRASIL

Silva e de Oliveira Filho *et al.* (2016) objetivaram levantar, analisar e sintetizar as principais políticas de incentivo que vêm sendo empregadas para promover o uso das fontes renováveis de energia visando a geração distribuída. Não obstante, foi levantada uma questão sobre a certificação de APPs no país (SILVA, DE OLIVEIRA FILHO, *et al.*, 2016), tendo sua necessidade e importância ratificadas nos trabalhos de Pereira, Montezano e Dutra (2015) e Pereira, da Silva e Freitas (2016).

Segundo Bertoi (2012) apud Silva e de Oliveira Filho *et al.* (2016), as políticas de incentivo para a geração distribuída podem ser organizadas em três grupos:

- **Políticas regulatórias:** que regularizam a troca ou venda da energia produzida;
- **Incentivos público-fiscais:** que se traduzem nas leis promulgadas com o objetivo de diminuir ou isentar impostos sobre a energia gerada e sobre as tecnologias de energia renovável; e
- **Financiamentos bancários:** que visam à implantação de linhas de financiamento específicos voltados ao setor.

4.2.1 Políticas regulatórias

Segundo Rua e Romanini (2013) apud Silva e de Oliveira Filho *et al.* (2016),

“Políticas regulatórias são aquelas que estabelecem imperativos, interdições e condições por meio das quais podem e devem ser realizadas determinadas atividades ou admitidos certos comportamentos (...). Elas podem variar de regulamentações simples e operacionais a regulações complexas, de grande abrangência. Ex.: Código de Trânsito, Lei de Eficiência Energética, Código Florestal, Legislação Trabalhista, etc. ” (SILVA, DE OLIVEIRA FILHO, *et al.*, 2016)

Porém, para fins de incentivo à micro e minigeração distribuídas, os principais mecanismos adotados são:

- **Feed-in tariff** (FiT) – mecanismo de incentivo visando a remuneração;
- **Net metering** – modelo de compensação de energia, ou seja, o faturamento da unidade geradora é dado pela diferença entre a quantidade de energia consumida e a quantidade gerada.

No Brasil, o modelo adotado foi o *Net metering*. Porém, mundialmente é o FiT que se mostra uma política regulatória bem-sucedida, principalmente na Europa, onde mostra que um sistema de FiT bem projetado é capaz de gerar um rápido crescimento das tecnologias de energias renováveis (NREL, 2014 apud SILVA, DE OLIVEIRA FILHO, *et al.*, 2016). Até o início de 2015, aproximadamente 80 países haviam regulamentado o FiT em seus territórios (REN21, 2015).

4.2.2 Incentivos públicos-fiscais

Além das políticas regulatórias, para se estabelecer condições favoráveis para o crescimento e evolução da geração distribuída no país, é necessário, igualmente, criar Programas e Projetos de Lei para estimular e desenvolver sua utilização e isentar ou reduzir tributos sobre a energia gerada e sobre os equipamentos utilizados em energia renovável (SILVA, DE OLIVEIRA FILHO, *et al.*, 2016). Como a energia elétrica é um bem de consumo, nela incidem tributos dos quais:

- **Tributos Federais:** PIS - Programa de Integração Social e COFINS - Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social;
- **Tributos Estaduais:** ICMS - Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação;
- **Tributos Municipais:** CIP ou COSIP - Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública.

A maioria dos estados do Brasil estão isentando ou reduzindo o ICMS como forma de incentivo à geração distribuída no país. Além do ICMS, a Lei nº 13.169/2015 reduz a zero as alíquotas da contribuição para o PIS/PASEP e COFINS incidente sobre a diferença positiva entre a energia

consumida e a energia injetada pelos autoprodutores. Existe também o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), lançado em 2015, com o objetivo de ampliar e aprofundar as ações de estímulo à geração distribuída de energia elétrica com fontes renováveis em residências, instalações industriais e comerciais, hospitais e edifícios públicos, escolas técnicas e universidades federais (SILVA, DE OLIVEIRA FILHO, *et al.*, 2016).

4.2.3 Financiamentos bancários

Em 2016, várias instituições bancárias oferecem linhas de financiamento especiais para Pessoa Física e Jurídica que deseje iniciar seus projetos em autoprodução de energia elétrica no país. Muitos desses programas estão voltados ao financiamento de bens de tecnologia renovável, como a compra de painéis solares e aerogeradores de pequeno porte. Porém, a maioria das linhas de financiamento estão voltadas para Pessoa Jurídica, sendo poucos os Programas que contemplam a Pessoa Física (SILVA, DE OLIVEIRA FILHO, *et al.*, 2016).

4.2.4 Portaria INMETRO nº 168/2015

As políticas de incentivo apresentadas têm como objetivo estimular o consumidor a aderir à micro e minigeração distribuída através de fontes renováveis de energia. Embora os incentivos na área sejam recentes, a ANEEL prevê um crescimento significativo para os próximos anos: estima-se que cerca de 1,2 milhão de residências no Brasil produzirão a própria energia até 2024, o que equivale a 4,5 gigawatts de potência instalada (ANEEL, 2016 apud SILVA E DE OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2016).

O impacto desse crescimento reflete-se diretamente na quantidade de aerogeradores de pequeno porte comercializados. Por isso, é fundamental certificá-los para assegurar ao consumidor a boa funcionalidade, qualidade e segurança das máquinas. Cabe ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) definir normas e acreditar organismos para esse fim.

A Portaria nº 168, publicada pelo INMETRO em 23 de março de 2015, estabelece os requisitos para certificação voluntária de aerogeradores destinados à produção de energia elétrica. No

documento, os critérios para certificação têm foco no desempenho, atendendo às exigências presentes nas normas técnicas ABNT NBR IEC 61400-12-1 – que trata do desempenho dos aerogeradores – e IEC 61400-11 – que lida com o ruído gerado pelos APPs. Com isso, foram estabelecidos os modelos de certificação, vistos no item 2.14.7, ambos com validade inicial de quatro anos (INMETRO, 2015 apud SILVA E DE OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2016):

Porém, como visto no **Capítulo 2** (item 2.16.7), essa portaria não realiza a verificação dos ensaios obrigatórios segundo a IEC 61400-2, como os de Duração e Segurança e Função.

4.2.5 Eólica e solar para geração distribuída

No Brasil, a energia solar de pequeno porte vem obtendo maior aceitação por parte dos consumidores frente às demais modalidades de energia renovável. De fato, desde a publicação da REN 482/2012 pela ANEEL até outubro de 2015, segundo dados da própria agência, 1233 (96%) mini e micro centrais geradoras funcionavam a base de fonte solar fotovoltaica, 31 (2,4%) a base de eólica, 13 (1%) a base de fonte híbrida (solar e eólica) e menos de 1% eram movidas a biogás (6), biomassa (1) e hidráulica (1) (ANEEL, 2016).

Essa diferença pode ser atribuída ao nosso grande potencial solar (TIBA, 2000) frente a pouca divulgação da tecnologia eólica de pequeno porte no país e à ausência de um mapa eólico mais preciso e confiável, capaz de fornecer dados a baixas alturas (até 50 m). Em uma tentativa de mitigar essa situação, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) lançou em 2017 uma Atlas Eólico, com simulações realizadas em 2013, para várias alturas (CEPEL, 2017). Por isso, os pequenos aerogeradores ainda estão, de forma geral, distantes de oferecer ao consumidor um produto no estado da arte, visto que apresentam eficiência e confiabilidade questionáveis, já que muitos ainda são produzidos artesanalmente. Inclusive, esse é um dos principais motivos que evidenciam a necessidade de certificação dos pequenos aerogeradores em conformidade com as normas técnicas vigentes e as discutidas no terceiro tópico deste trabalho.

Não obstante, políticas regulatórias voltadas ao estímulo de fontes de energia renovável como o FiT ampliaram o emprego de aerogeradores de pequeno porte em países europeus como Itália e

Reino Unido (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2016). Em razão disso, no momento em que o Brasil passar a adotar tal política juntamente com mapeamentos mais amplos e confiáveis de ventos, maior divulgação das tecnologias de energia eólica e aerogeradores certificados, mais consumidores irão adquirir APPs como fonte de sua mini e microgeração de energia.

4.2.6 Considerações

Em vista dos argumentos apresentados, o *feed-in tariff* (FiT) é a política regulatória que vem obtendo sucesso na Europa, sendo empregada em aproximadamente 80 países pelo mundo e, devido ao seu sistema de remuneração frente ao sistema de créditos do *Net metering* e aos benefícios que propicia ao consumidor autossuficiente, deve ser a política regulatória mais indicada para conduzir o desenvolvimento da geração distribuída no país (SILVA, DE OLIVEIRA FILHO, *et al.*, 2016).

O público-alvo da maior parte dos programas de financiamento pesquisados está direcionado a empresas, indústrias e negócios, que se configuram como Pessoa Jurídica. No entanto, o principal objetivo das regulamentações publicadas pela ANEEL é estimular o consumidor comum – Pessoa Física – a gerar sua própria energia. Por isso, é evidente a incoerência que há entre a política regulatória estabelecida pela ANEEL e os financiamentos bancários em vigor, o que se constitui um entrave ao desenvolvimento da geração distribuída de Pessoa Física no país (SILVA, DE OLIVEIRA FILHO, *et al.*, 2016).

A necessidade de se certificar aerogeradores de pequeno porte de acordo com as normas IEC 61400-2 e ABNT-NBR IEC 61400-21 é evidente, pois a garantia de segurança, duração, funcionalidade e qualidade da energia dos aerogeradores só são asseguradas quando os ensaios contidos nessas normas são aplicados. Por esse motivo, o INMETRO deveria adotá-los na Portaria nº 168/2015 e informar os resultados no selo emitido (Figura 46). A certificação de aerogeradores no Brasil é mais um incentivo à geração distribuída no país (SILVA, DE OLIVEIRA FILHO, *et al.*, 2016).

Vale salientar que os mercados de energia solar e eólica são distintos e devem operar em regime de complementaridade e não de concorrência. Ainda de acordo com os índices apresentados no subitem 4.2.5, a energia eólica não pode ser considerada, em termos de geração, inferior a solar, uma vez que aerogeradores chegam a ter rendimento energético maior do que painéis fotovoltaicos; além do mais, o insumo eólico está sempre disponível, o que não ocorre com a fonte solar, que apresenta limitações durante a noite. Visto que há incentivos de redução de impostos sobre painéis solares e sendo a maioria dos painéis importados da China e países adjacentes, surge o questionamento: ao invés de apenas retirar impostos de placas solares importadas, por que não, também, criar núcleos de produção e desenvolvimento de pequenos aerogeradores no Brasil? (SILVA, DE OLIVEIRA FILHO, *et al.*, 2016).

4.3 RESUMO DO CAPÍTULO 4

Este **Capítulo 4** mostrou uma análise de mercado segundo relatórios técnicos internacionais e pesquisas relacionadas ao mercado nacional e internacional. Evidenciou também uma visão geral das políticas de incentivos relacionadas para tentar alavancar a geração distribuída no Brasil juntamente com algumas críticas construtivas a essas políticas, bem como a necessidade da certificação de APPs, fruto do artigo publicado no CONEM 2016 onde o autor desta tese participou como coautor.

As máquinas instaladas no Brasil possuem características incompatíveis, em sua maioria, com as condições climáticas locais, principalmente na região Nordeste onde as características de vento são diferenciadas. Isso se referindo a aerogeradores de grande porte. Não tão distante, os APPs também seguem essa linha, mesmo os fabricados no Brasil, atingindo sua potência nominal em velocidades elevadas (10-12 m/s) e ainda com o agravante de essas máquinas serem instaladas, geralmente, a baixas alturas, o que dificulta atingir altas velocidades de vento.

É importante observar que no Nordeste do país os ventos são praticamente constantes em direção e magnitude, o que faz repensar nos conceitos das máquinas existentes e em seus projetos, que em sua maioria são europeus onde as características de vento diferem das do Nordeste do Brasil.

Desenvolvendo-se projetos para a realidade do vento dessa região, a tendência é de se diminuir o custo final da energia ao consumidor e aumentar a produção de energia para baixas velocidades. Isso requer investimentos em projetos e infraestrutura.

Em vistas ao exposto, fica evidente que o país necessita de maiores investimentos no setor de APPs, principalmente da união Universidades/Empresas para desenvolvimento de tecnologias, um centro de ensaios e testes experimentais de excelência no país e avaliação do recurso eólico para baixas alturas (até 50 m ou mais baixa), além de políticas de incentivo mais adequadas, pertinentes e menos burocráticas para que a geração distribuída seja alavancada.

Dessa forma, este trabalho ajuda a identificar/selecionar potencialmente o melhor local para a realização dos ensaios dessas máquinas, sejam elas de pequeno ou grande porte, sem que haja medições locais, pois varre todas as possibilidades de características de vento intrínsecas ao parâmetro de Weibull k .

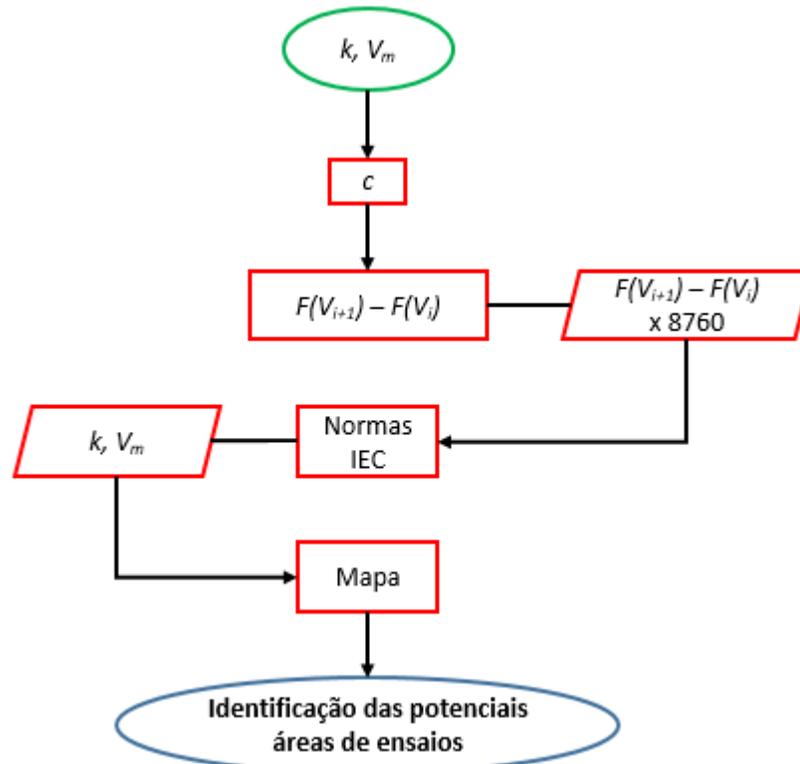
5 METODOLOGIA

Esta seção irá apresentar uma metodologia para selecionar características de vento com potencial para a realização de ensaios e testes de aerogeradores que atendem aos critérios das normas IEC utilizando a velocidade do vento como critério. Posteriormente, será confrontado com um mapa eólico a 50 m para realizar a superposição daquelas informações para identificar espacialmente potenciais zonas/áreas viáveis para a realização dos ensaios e testes.

5.1 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

A metodologia consiste em selecionar características de vento (fatores de forma de Weibull, k) em uma faixa de velocidades do vento médias anuais para a determinação do fator de escala de Weibull, c [m/s]. Com isso, para a faixa de velocidades de operação das máquinas [0-30] m/s, em intervalos de 0,5 m/s, será calculada $P(V_i < V < V_{i+1}) = F(V_{i+1}) - F(V_i)$, onde $F(V)$ é a função cumulativa de Weibull, e estimada quantas horas em um ano uma determinada velocidade ocorre naquela faixa. De posse dessas informações, serão confrontadas agora com o que diz as normas IEC, ou seja, quantas horas em determinada velocidade de vento são necessárias para cobrir cada ensaio. Depois disso, confrontando-se com um mapa interativo dos dados eólicos da região, será mostrado os potenciais locais para cada tipo de ensaio, ou o que abranger maior número de ensaios. O fluxograma mostrado na Figura 58 ilustra este procedimento.

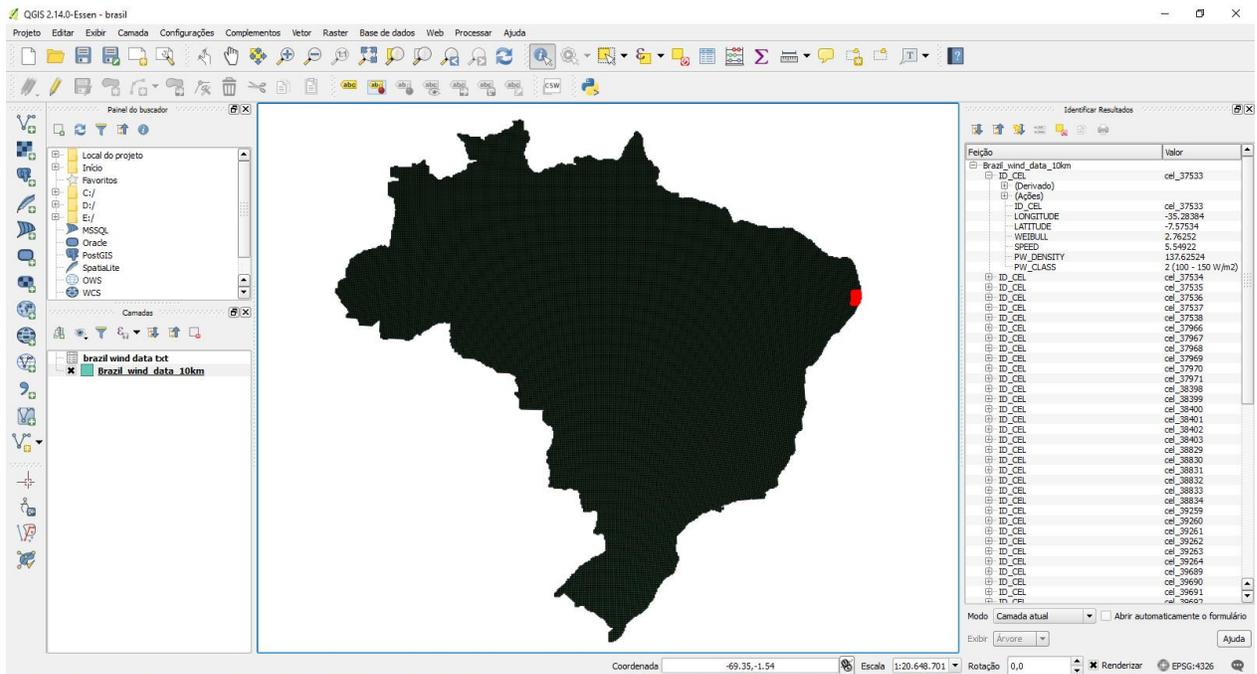
Figura 58. Fluxograma da metodologia.



Fonte: o autor.

Para a seleção do local, serão utilizados os dados do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), denominado *Brazil Wind Data* (10 km) que consiste em um mapa eólico organizado em células de 10x10 km a 50 m de altura e que cobre todo o território nacional. Esse mapa foi construído por simulações utilizando o MesoMap para 1 ano típico, extraído de um período de 15 anos de dados. Nele estão contidas informações como: velocidade média anual (m/s); densidade de potência (W/m^2); classes de potência; e valores do fator de forma de Weibull, k (CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008). O mapa é visualizado em algum programa que interprete o *Geographic Information System* (GIS), como por exemplo o programa aberto (*open source*) QGIS, Figura 59. Porém, os dados foram extraídos no formato .txt para alimentar o *script* desenvolvido no MatLab® e assim confrontar com o par k e V_m utilizado.

Figura 59. Mapa contendo as informações aberto no QGIS.



Fonte: (QGIS, 2017)

5.2 DESCRIÇÃO DETALHADA DA METODOLOGIA

- Os valores de k e V_m deverão estar compreendidos em intervalos pré-definidos, discretizados de acordo com a precisão desejada: $k = [k_1, \dots, k_n]$ e $V_m = [V_{m1}, \dots, V_{mn}]$, $i=1, \dots, n$ onde n é o número de elementos obtidos com o critério de discretização;
- Para cada valor de k será associado valores do vetor V_m velocidade média anual;

$$k_1, V_{m1} \quad k_1, V_{m2} \quad k_1, V_{mn}$$

$$k_2, V_{m1} \quad k_2, V_{m2} \quad k_2, V_{mn}$$

$$k_i, V_{m1} \quad k_i, V_{m2} \quad k_i, V_{mn}$$

- Utilizando a Equação B5 (APÊNDICE B), obtém-se uma nova matriz com as possibilidades de valores do fator de escala de Weibull, c [m/s];

$$\begin{bmatrix} c_{1,1} & \dots & \dots & c_{1,n} \\ \dots & \dots & & \dots \\ \dots & & \dots & \dots \\ c_{4,1} & \dots & \dots & c_{m,n} \end{bmatrix}$$

- Para cada c da matriz anterior pode-se obter, através da aplicação da $P(V_i < V < V_{i+1}) = F(V_{i+1}) - F(V_i)$, onde $i=1, \dots, n$, um vetor das $F(V_{i+1}) - F(V_i)$, na faixa de velocidades do vento (V) típica de operação das máquinas;

$$\begin{bmatrix} F(V_{i+1}) - F(V_i)_{1,1} \\ \dots \\ F(V_{i+1}) - F(V_i)_{m,1} \end{bmatrix}$$

- A partir do vetor das distribuições de frequência, multiplicando-se pelo escalar número de horas do período T , $[F(V_{i+1}) - F(V_i)] \times T$, pode-se então estimar o número de horas nos intervalos de velocidades de operação da máquina para um dado período de ensaio (T);
- Classifica-se, segundo o critério do número de ocorrências, o vetor ocorrência $[F(V_{i+1}) - F(V_i)] \times T$ em função da adequabilidade às exigências da IEC, confrontando-se o número de horas de cada velocidade (V) com o número de horas necessário para cada ensaio segundo as normas IEC;
- Com essas informações, é possível identificar um potencial local para cada ensaio, ou o que abranger maior número de ensaios possíveis para o par k e V_m .

Lembrando que na escolha do local é preciso saber a que altura a velocidade média ocorre. Isso pode ser utilizado posteriormente como mais um critério de seleção da área de ensaios e testes.

5.3 RESUMO DO CAPÍTULO 5

Este **Capítulo 5** apresentou uma metodologia para identificação de potenciais áreas para centros de ensaios e testes de aerogeradores. É uma metodologia de caráter inovativo, desenvolvida para esta tese de doutorado e com aplicação no Projeto Sudene/AREA e que pode ser aplicada também em quaisquer outros locais onde se necessite de uma área de ensaios sem medições anemométricas, pois, varre todas as possibilidades de características de vento intrínsecas ao parâmetro de forma de Weibull, k .

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a metodologia ser implementada no MatLab®, foram simulados os seguintes cenários:

- k [1;0,1;6] – k variando de 1 à 6 com passo de 0,1;
- V_m [1;0,1;12] m/s – velocidade média variando de 1 à 12 com passo de 0,1.

Para cada par k e V_m (7200 combinações possíveis neste caso) foi calculado um fator de escala de Weibull c e em consequência a distribuição de frequência de Weibull no intervalo, ou seja $P(V_i < V < V_{i+1}) = F(V_{i+1}) - F(V_i)$. A Tabela 12 exemplifica um cenário ($k=2$, $V_m=6$ m/s).

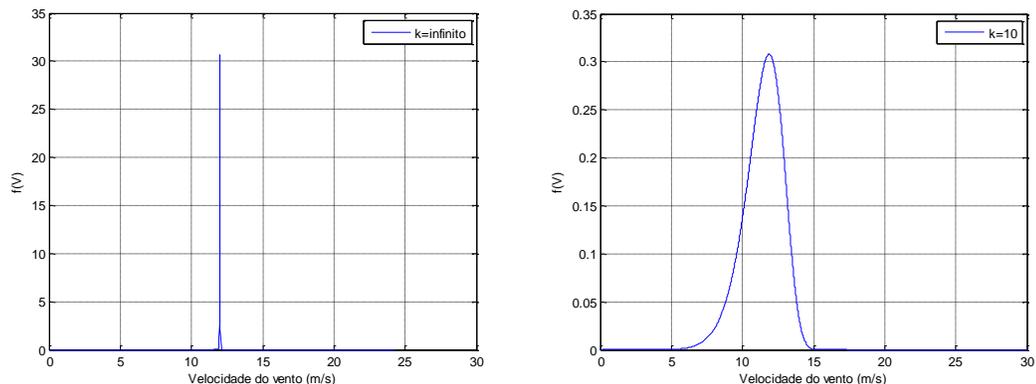
Tabela 12. Ocorrência das faixas de velocidades.

V (m/s)	$F(V_{i+1}) - F(V_i)$	Horas no ano	V (m/s)	$F(V_{i+1}) - F(V_i)$	Horas no ano
0-0,5	0,5440%	47,65	12,5-13	0,8031%	70,35
0,5-1	1,6142%	141,41	13-13,5	0,6286%	55,07
1-1,5	2,6324%	230,60	13,5-14	0,4860%	42,58
1,5-2	3,5668%	312,45	14-14,5	0,3712%	32,52
2-2,5	4,3902%	384,58	14,5-15	0,2801%	24,54
2,5-3	5,0812%	445,12	15-15,5	0,2088%	18,30
3-3,5	5,6250%	492,75	15,5-16	0,1539%	13,48
3,5-4	6,0136%	526,79	16-16,5	0,1120%	9,81
4-4,5	6,2463%	547,17	16,5-17	0,0806%	7,06
4,5-5	6,3289%	554,41	17-17,5	0,0573%	5,02
5-5,5	6,2727%	549,49	17,5-18	0,0402%	3,53
5,5-6	6,0939%	533,83	18-18,5	0,0280%	2,45
6-6,5	5,8117%	509,11	18,5-19	0,0192%	1,68
6,5-7	5,4475%	477,20	19-19,5	0,0130%	1,14
7-7,5	5,0230%	440,01	19,5-20	0,0087%	0,76
7,5-8	4,5595%	399,42	20-20,5	0,0058%	0,51
8-8,5	4,0770%	357,14	20,5-21	0,0038%	0,33
8,5-9	3,5927%	314,72	21-21,5	0,0025%	0,22
9-9,5	3,1214%	273,44	21,5-22	0,0016%	0,14
9,5-10	2,6747%	234,31	22-22,5	0,0010%	0,09
10-10,5	2,2611%	198,08	22,5-23	0,0006%	0,05
10,5-11	1,8863%	165,24	23-23,5	0,0004%	0,03
11-11,5	1,5532%	136,06	23,5-24	0,0002%	0,02
11,5-12	1,2625%	110,59	24-24,5	0,0001%	0,01
12-12,5	1,0133%	88,76	24,5-25	0,0001%	0,01
12,5-13	0,8031%	70,35	25-25,5	0,000%	0,00

Com as probabilidades de ocorrência estimadas no ano para cada intervalo de 0,5 m/s, foram construídos gráficos k vs. V_m que mostram a viabilidade do par de entrada (k , V_m) para determinado ensaio (APÊNDICE C).

Os gráficos foram confeccionados para o par k e V_m , sendo a área branca viável e a preta inviável para o par. Se o ponto selecionado (k , V_m) cai na região imediatamente após a área preta, isso significa também que o ensaio é viável, pois, ao se confrontar com as condições da Norma, o par foi aprovado no teste computacional. Quanto mais próximo de 2 o valor do parâmetro k , mais ampla é a faixa de velocidades que ocorre, aumentando a probabilidade de realização de ensaios que requeiram amplas faixas de velocidades (baixas e altas, principalmente). Observa-se que, quanto maior a velocidade média do local, para valores de k em torno de 2, mais provável de se atingir o objetivo de realização do ensaio. Já para valores de k muito elevados (>9) com velocidades médias também elevadas (>11 m/s), a tendência é de que a região inviável torne a aumentar (observa-se na Figura 61, por exemplo). Isso ocorre devido ao fato de que para valores de k dessa magnitude, a curva da distribuição de frequência tende a uma linha vertical (Figura 60) e como os valores da velocidade média são muito altos significa dizer que a probabilidade de ocorrência é muito pequena ou zero, para velocidade maiores ou menores que o valor médio, fazendo com que o ensaio seja inviabilizado.

Figura 60. $k \rightarrow \infty$ (esq.) e $k=10$ para $V_m = 12$ m/s.



Fonte: o autor.

As simulações foram realizadas para os ensaios descritos no APÊNDICE C para a base temporal anual. Essas simulações foram separadas em duas partes, assumindo alguns parâmetros por padrão como segue:

PARTE 1 – Viabilidade do par k e V_m

Passo 1: determinação de parâmetros diversos

- Faixa de velocidades do vento no local (padrão: 1 – 30 m/s);
- Velocidades de *cut-in* e *cut-out* (padrão: 3 e 25 m/s, respectivamente).
- Intervalo para a faixa de velocidades a ser considerada (padrão: 0,5 m/s);
- Probabilidade de corte: determina um valor mínimo para a probabilidade, abaixo do qual será desconsiderada uma determinada ocorrência (probabilidades nulas). (padrão: 0,0020%). OBS.: com esse valor as ocorrências com menos de 10 minutos serão desconsideradas. O parâmetro afeta a permissividade da realização dos ensaios que mencionam que o ensaio deve varrer a faixa de velocidades de operação da máquina;
- Faixa de parâmetros de forma de Weibull (k) que serão avaliados em varredura (padrão: 1-6, com passos de 0,1); e
- Faixa de velocidades médias (V_m) que serão avaliadas em varredura (padrão: 1-12 m/s, com passos de 0,1 m/s).

Passo 2: varredura que faz a verificação de viabilidade para a realização de ensaios para todos os possíveis pares k e V_m , calculando as probabilidades de ocorrência para cada velocidade da faixa de operação das máquinas como descrito no Passo 1 e confrontando com o número de horas determinado pelas Normas. A verificação foi realizada para cada subensaio (critérios descritos no APÊNDICE C), que resultam na verificação final do ensaio. Além disso, foi feita a verificação de viabilidade global, que determina a viabilidade de se realizar todos os ensaios considerados.

Passo3: *plot* de gráficos de pares k e V_m que viabilizam ou inviabilizam a realização de cada subensaio, ensaios (individualmente), e de todos os ensaios.

PARTE 2 – Visualização/Seleção das áreas de ensaios

Passo 1: Carrega os dados do atlas.

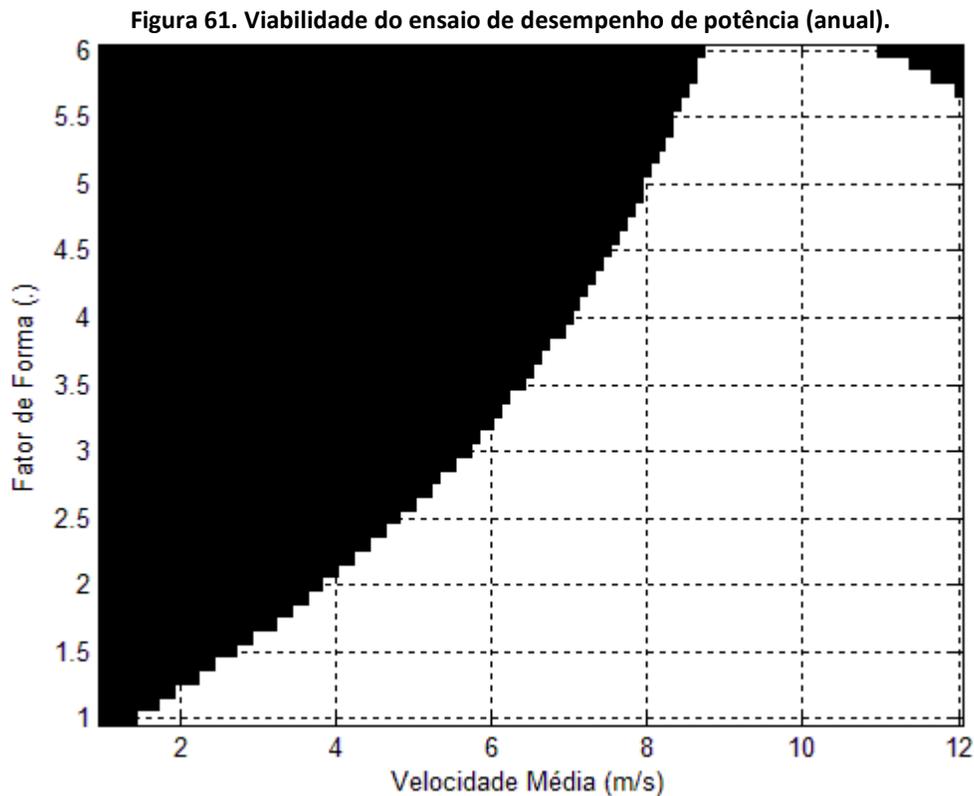
Passo 2: Verifica no atlas se os pares k e V_m de cada local atendem à realização de cada subensaio, ensaio e de todos os ensaios.

Passo 3: *plot* de gráficos com resultados do Passo 2.

Apesar de os gráficos dos resultados mostrarem $1 \leq k \leq 6$ e as velocidades estarem variando entre $1 \leq V \leq 30$ m/s como mostrado no **Passo 1** da **Parte 1** acima por questão de programação, serão analisados apenas os valores de $k \geq 2$ e as velocidades acima das de *cut-in*. Do exposto, segue os resultados e discussões dos gráficos gerados.

6.1 VIABILIDADE DO ENSAIO DE DESEMPENHO DE POTÊNCIA

O ensaio de desempenho de potência configura a curva de potência da máquina em um gráfico Potência (kW) vs. Velocidade do vento (m/s), obedecendo os critérios mostrados no APÊNDICE C. A Figura 61 mostra a viabilidade do ensaio de desempenho de potência na base temporal anual.

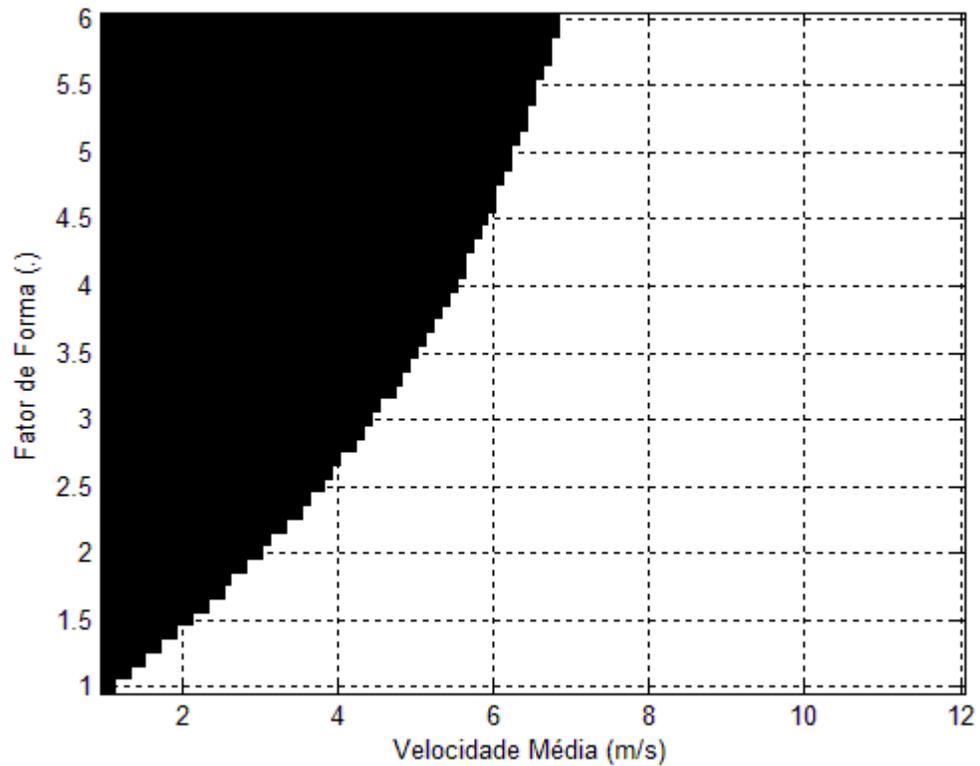


Nota-se que a área mais clara (branca) é predominante, ficando o ensaio de desempenho de potência na base anual permissível na maioria dos pares. Vale lembrar que os valores máximos para o nordeste brasileiro da velocidade de vento e do fator de forma de Weibull (k) a 50 m de altura (*hub height*) são de 10 m/s e 4,5 respectivamente (SILVA, 2003, p. 32). É importante ressaltar que esses valores são correspondentes aos do Atlas Eólico, podendo ter variações com medições reais. Assim, para o par $k=2$ e $V_m=6$ m/s por exemplo, é fácil verificar pela Figura 61 que o ensaio de desempenho de potência é factível. Senão, quando $k=3,5$ por exemplo, esse ensaio torna-se inviável, ou seja, possivelmente não será realizado nessas condições. Assim, as características da área de ensaios para o ensaio de desempenho de potência podem ter um fator de forma de Weibull $2 \leq k \leq 6$ para velocidades médias variando de $4 \leq V_m \leq 12$ em uma base temporal anual, obedecendo o par (k, V_m) correspondente à área de viabilidade (área branca).

6.2 VIABILIDADE DO ENSAIO DE RUÍDO ACÚSTICO

O ensaio de ruído acústico determina as características de emissão de ruído. Não é um ensaio obrigatório, mas importante. Por exemplo, em seu selo de eficiência energética o INMETRO (Figura 46) contém a informação de ruído acústico exigido do seu ensaio. São vários fatores que determinam o ensaio de ruído acústico segundo a IEC 61400-11, porém, apenas se está analisando o fator velocidade do vento como critério. Observa-se pelo gráfico da Figura 62 que para as faixas de k e V_m analisadas esse ensaio é provável na maioria dos pares. Nota-se que para $2 \leq k \leq 4,5$ as velocidades médias necessárias são relativamente baixas, permitindo que o ensaio de ruído acústico, pelo critério de velocidade do vento, seja factível para a maioria dos pares.

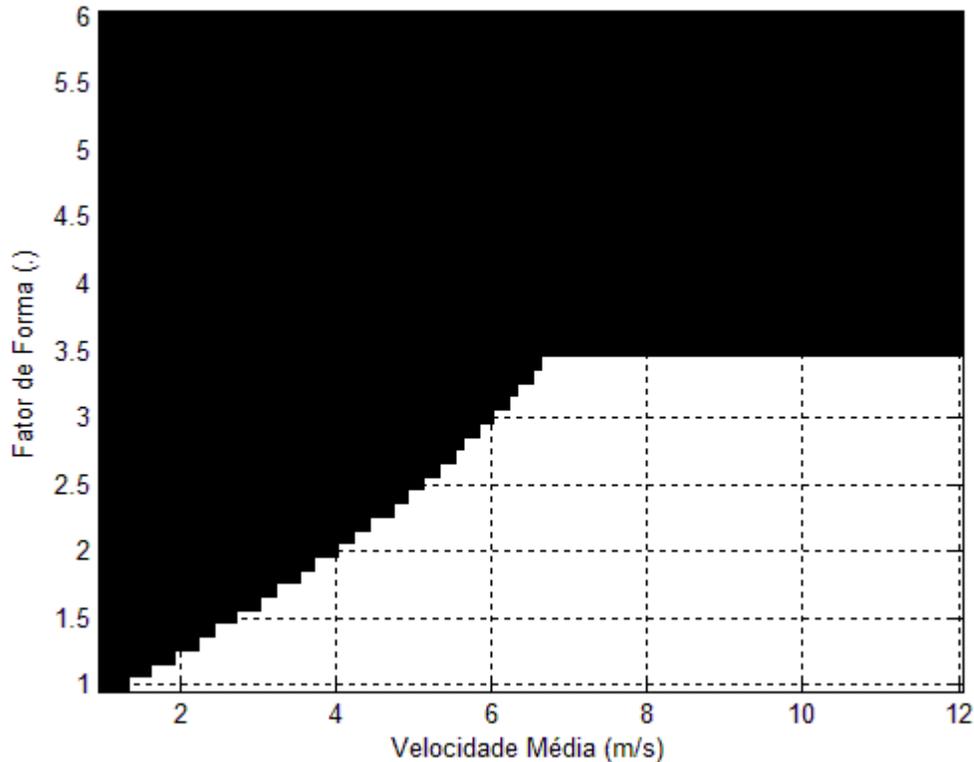
Figura 62. Possibilidades do ensaio de ruído acústico.



6.3 VIABILIDADE DO ENSAIO DE DURAÇÃO

O ensaio de duração investiga a integridade estrutural e a degradação dos componentes (corrosão, rachaduras, deformações), a qualidade de proteção ambiental e o comportamento dinâmico, obedecendo os critérios mostrados no APÊNDICE C. A Figura 63 apresenta os resultados das simulações na base anual.

Figura 63. Viabilidade do ensaio de duração (anual).



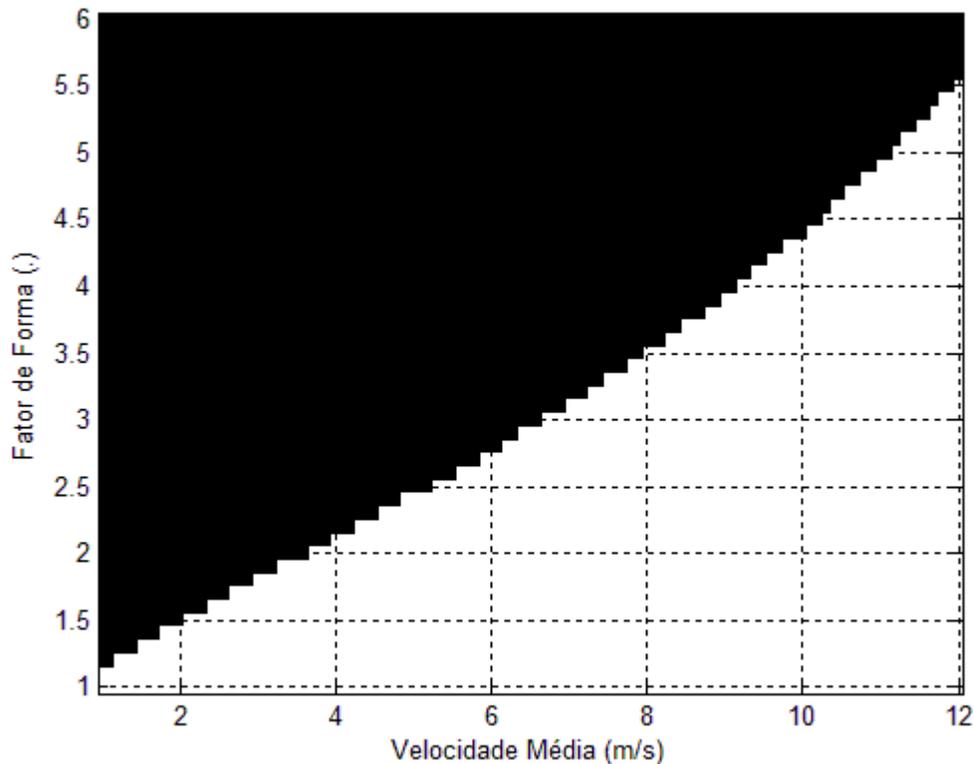
Nota-se que há uma área restritiva maior que a permissível. Na Figura 63, observa-se que para $k < 3,5$ e $V_m \geq 7$ m/s o ensaio de duração é sempre viável. Para $k=2$, velocidades médias maiores que 4 m/s até 12 m/s o ensaio também se torna possível. Ou seja, as características da área de ensaios para o ensaio de duração devem ter um fator de forma de Weibull $2 \leq k < 3,5$ para velocidades médias variando de $4 < V_m \leq 12$ em uma base temporal anual, obedecendo o par (k, V_m) correspondente à área de viabilidade (área branca).

6.4 VIABILIDADE DO ENSAIO DE SEGURANÇA E FUNÇÃO

O ensaio de segurança e função verifica o comportamento previsto de projeto e se as disposições relativas à segurança pessoal estão adequadamente implementadas. O ensaio não faz referência à quantidade de horas necessárias com a velocidade do vento. Porém, foi estipulada uma faixa de velocidades que varre a faixa de operação dos aerogeradores. Assim, a Figura 64 mostra a viabilidade deste ensaio segundo o critério estabelecido para a base temporal anual. Nota-se que o ensaio é restritivo para a maioria dos pares. Foi estabelecido um critério de corte, ou seja, um

número de horas mínimo para haver possibilidade de o teste ser executado, no caso $8760 \times 0,00002 \approx 10$ min (1/6 de hora), já que o ensaio não contempla o critério de velocidade de vento e nem se tem velocidades muito elevadas no país. Então, para um local contemplar o ensaio apenas de Segurança e Função teria que ter as seguintes características: $2 \leq k \leq 5,0$ e $4 \leq V_m \leq 12$, contemplando a área branca.

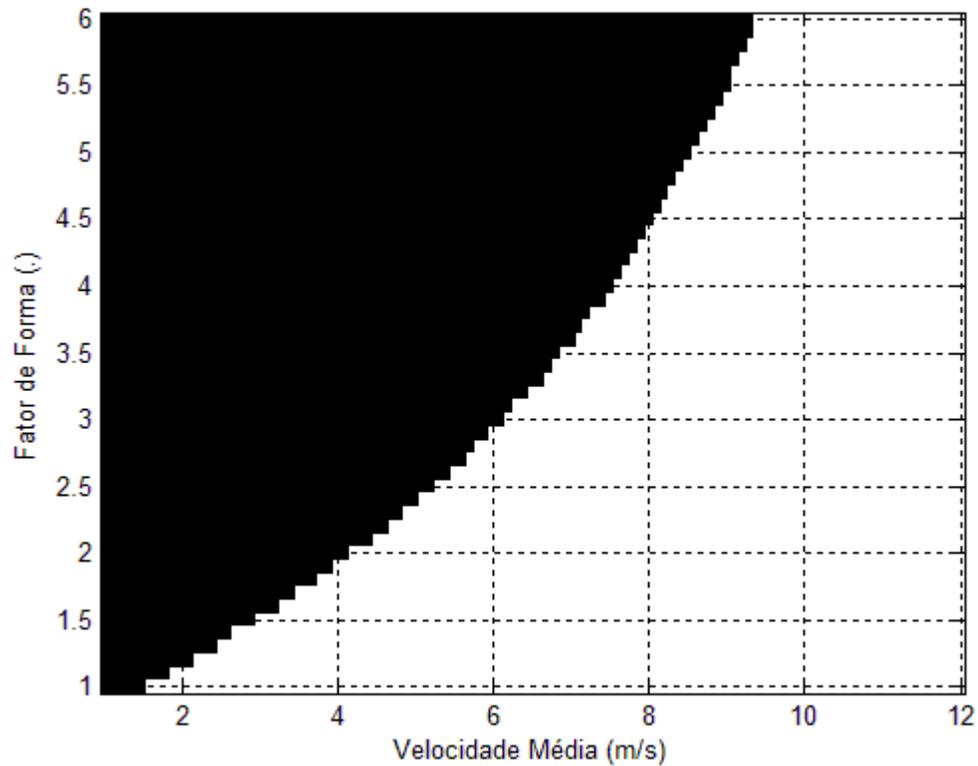
Figura 64. Viabilidade do ensaio de segurança e função.



6.5 VIABILIDADE DO ENSAIO DA QUALIDADE DA ENERGIA

O ensaio da qualidade da energia mede as características de qualidade de energia de aerogeradores conectados à rede. Seguindo os critérios estabelecidos no APÊNDICE C, o gráfico da Figura 65 foi construído. Verifica-se que para $k=2$ e $V_m > 4$ m/s os ensaios são possíveis. Já para locais com valores de k elevados, como $k \geq 3$, necessita-se de velocidades médias $V_m > 6$ m/s para a realização deste ensaio. Estas são as características necessárias para um local da potencial área de ensaios de qualidade da energia, segundo os dados utilizados.

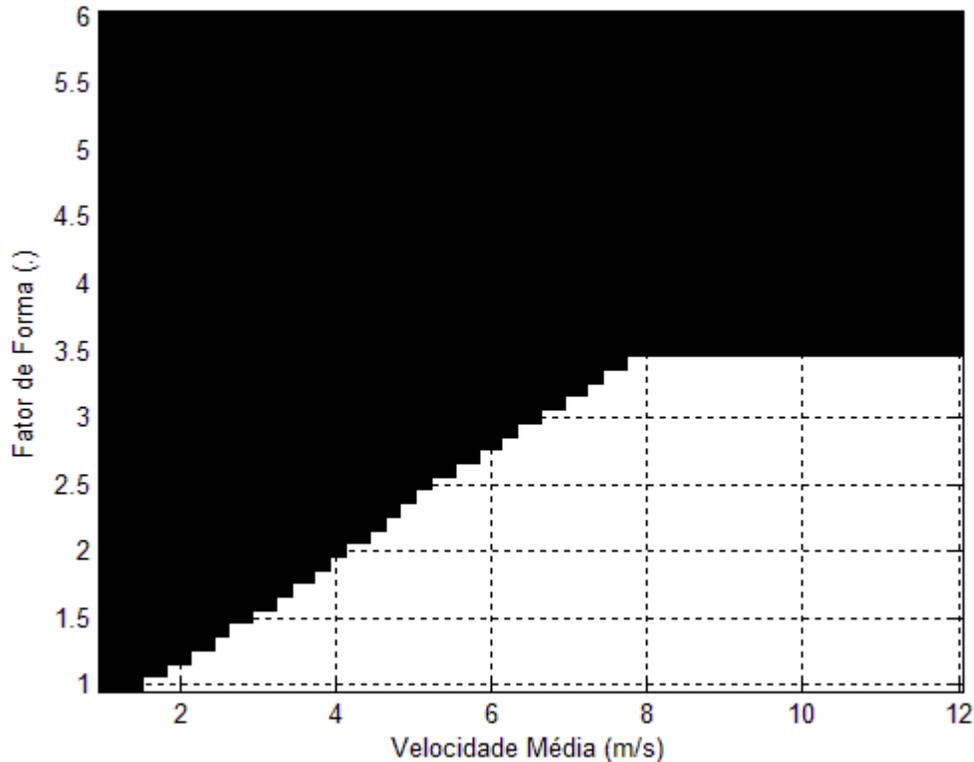
Figura 65. Possibilidades do ensaio de qualidade da energia.



6.6 VIABILIDADE DE TODOS OS ENSAIOS

A Figura 66 mostra a possibilidade de todos os ensaios com o par de entrada (k, V_m) . Nota-se que a área de possibilidades (representada pela cor branca) ficou mais restrita, principalmente devido ao ensaio de duração. Ou seja, para que um local tenha as características necessárias para a realização de todos os ensaios ele precisa ter o par (k, V_m) dentro da área branca do gráfico, sendo $2 \leq k < 3,5$ e $4 < V_m \leq 12$, obedecendo os devidos pares.

Figura 66. Gráfico reunindo a viabilidade de todos os ensaios simultaneamente.



6.7 POTENCIAIS ÁREAS DE ENSAIOS

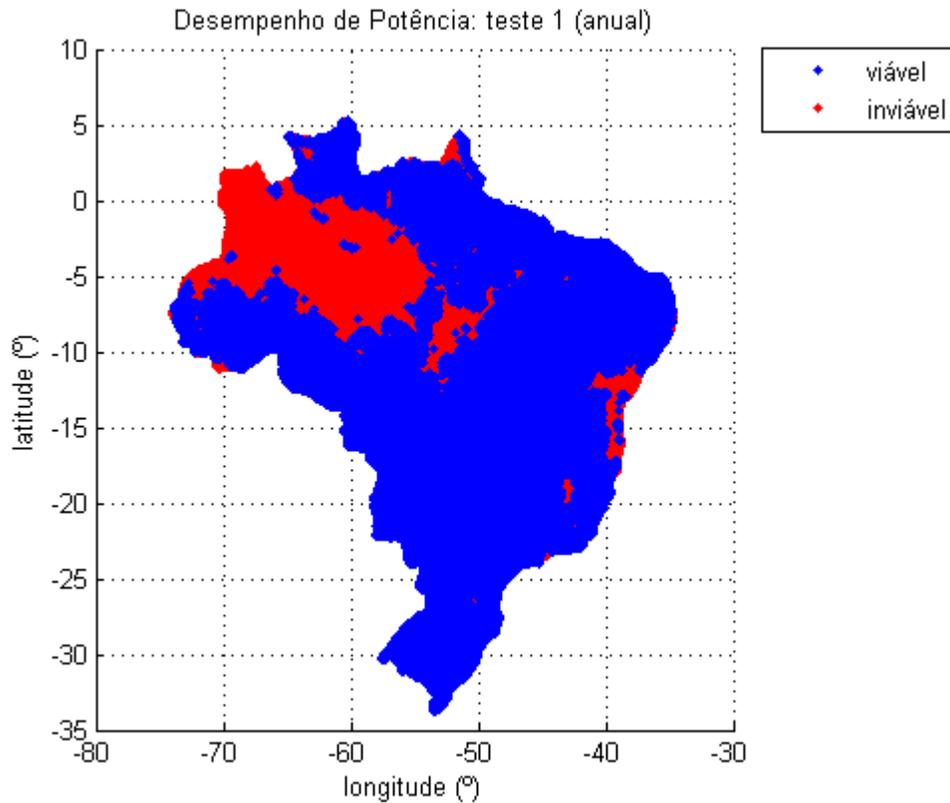
Como descrito no APÊNDICE C, foram confrontados os pares (k, V_m) dos resultados viáveis apresentados acima com os pares dos dados do mapa eólico a 50 m. Essa área permissível significa que os pares aprovados (viáveis) descritos no **Passo 1** foram confrontados com os valores dos dados do Mapa Eólico e assim surgiu essa região provável para a realização desse ensaio. A região em vermelho (mais escura) significa que o ensaio não se mostrou viável corroborando com a realidade da floresta amazônica (em sua maior parte), região altamente rugosa e de baixas velocidades médias de vento. Na sequência serão apresentados os mapas dos possíveis locais para a realização dos ensaios.

6.8 POTENCIAIS ÁREAS DE ENSAIO PARA DESEMPENHO DE POTÊNCIA

Como descrito no APÊNDICE C, para o ensaio de desempenho de potência é requerido dois critérios de velocidades. Na Figura 67, observa-se os locais que seria possível a aplicação desse

ensaio segundo o critério: 1) cada *bin* de velocidade entre 1 m/s abaixo da velocidade de cut-in e 14 m/s deve conter um mínimo de 10 min de dados.

Figura 67. Potenciais locais para áreas de ensaios do ensaio de desempenho de potência, primeiro critério.



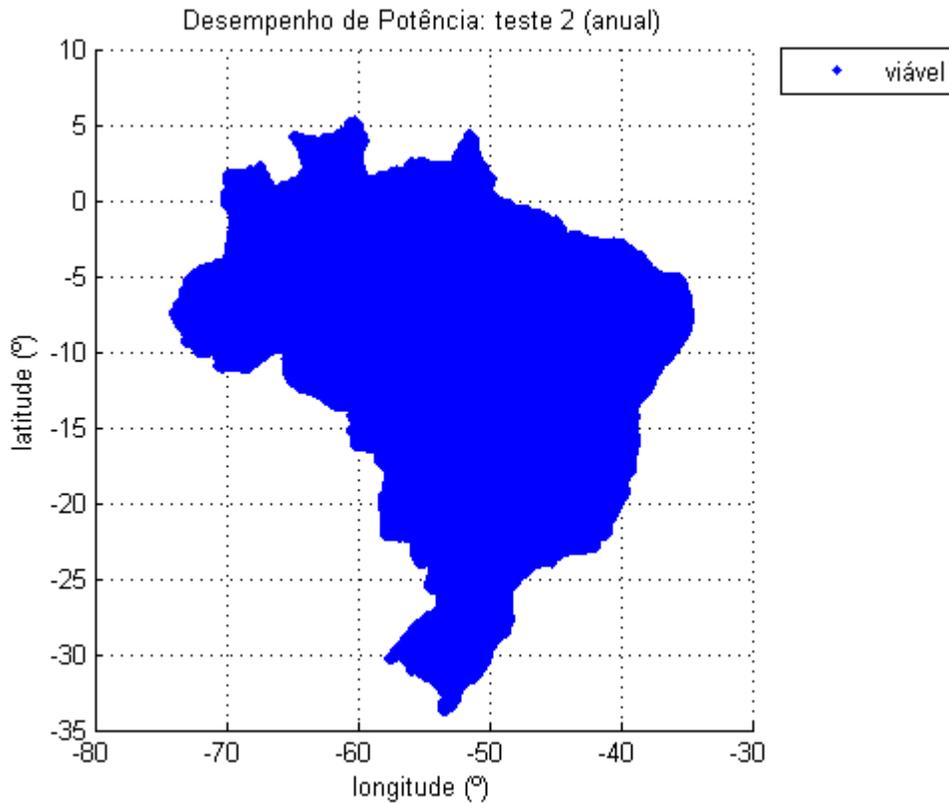
Observa-se na Figura 67 que a região em azul (região mais escura) é predominante, sendo potenciais áreas para a realização desse ensaio em praticamente em todo o território nacional, inclusive na região Nordeste.

A Figura 68 mostra as potenciais áreas para a realização do ensaio de desempenho de potência segundo o critério: 2) o banco de dados total deve conter pelo menos 60 horas de dados com o APP dentro da faixa de velocidades de operação da máquina.

A faixa de operação das máquinas em termos da programação foi de 3 a 25 m/s (*cut-in* e *cut-out* respectivamente) e como o critério é apenas ter 60 horas nessa faixa de operação

independentemente da velocidade, esse critério foi facilmente atingido e a realização do ensaio tornou-se viável em todo o país.

Figura 68. Potenciais locais para áreas de ensaios do ensaio de desempenho de potência, segundo critério.

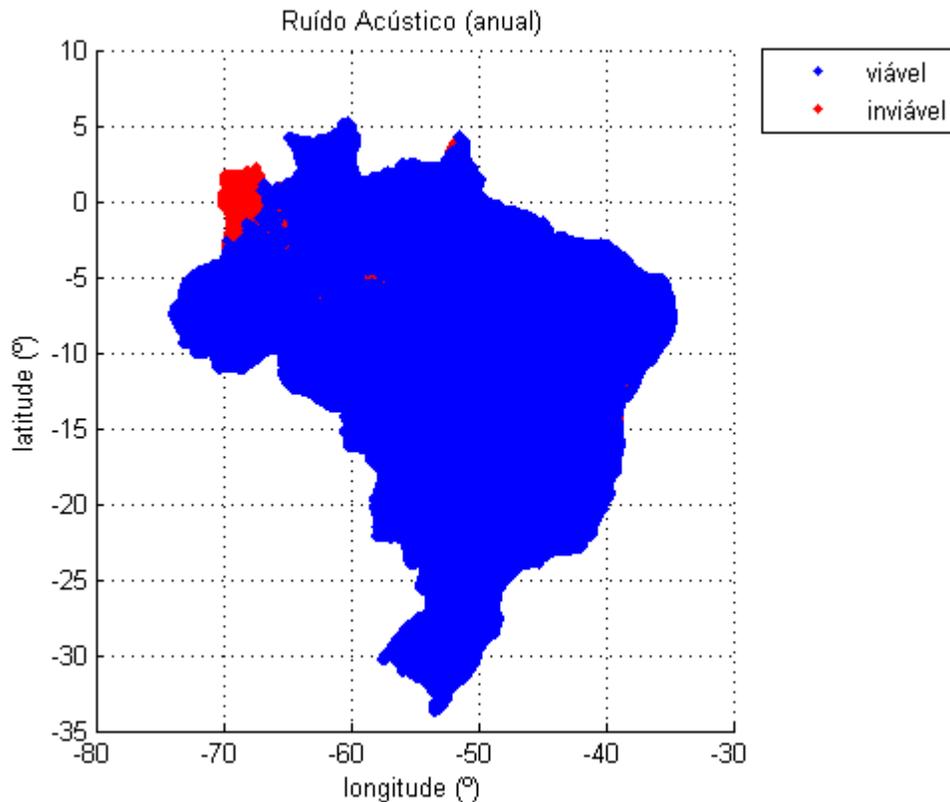


Porém, o ensaio de desempenho de potência para ser realizado é necessário que os dois critérios sejam atingidos. Dessa forma, a Figura 67 configura as potenciais áreas para a realização desse ensaio.

6.9 POTENCIAIS ÁREAS DE ENSAIO PARA RUÍDO ACÚSTICO

Com o critério estabelecido no APÊNDICE C para este ensaio, pelo método aplicado verifica-se que o ensaio é viável em quase todo o território nacional, Figura 69. É bom deixar claro que existem outros critérios para a realização desse ensaio (IEC 61400-11, anexo F desta Norma), porém essa avaliação apenas verificou o critério relativo à velocidade do vento.

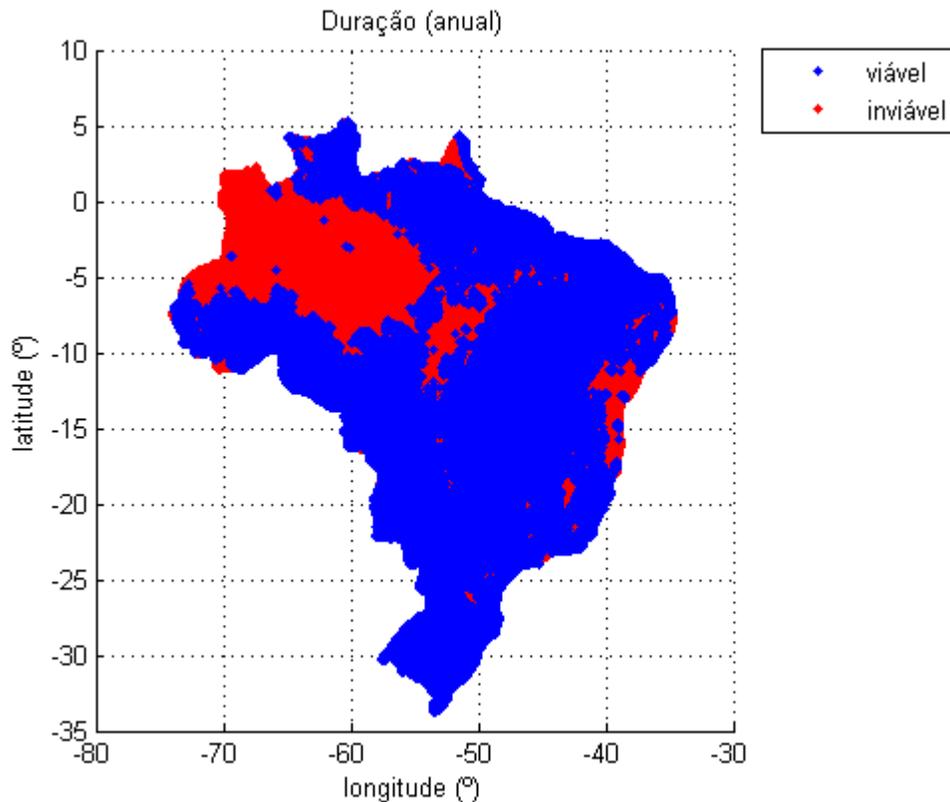
Figura 69. Potenciais locais para áreas de ensaios do ensaio de ruído acústico.



6.10 POTENCIAIS ÁREAS DE ENSAIO DE DURAÇÃO

As áreas de ensaio que são possíveis realizar o ensaio de duração estão mostradas na Figura 70. Nota-se que na maior parte do país é possível realizar o ensaio. Foram simulados os cenários dos pares (k, V_m) para os critérios apresentados no APÊNDICE C. Para cada critério foi confeccionado o mapa de viabilidade do ensaio, porém, para os critérios 2, 3 e 4 houve viabilidade do ensaio semelhante à Figura 68, o que não ocorreu para o critério 5 que determinou a inviabilidade o ensaio em algumas áreas do território nacional. Ainda assim, o ensaio é viável em uma região ampla do país. Lembrando que o critério 5 estabelece: 10 min em velocidades de vento a $2,2V_m$ e acima, porém não menos que 15,0 m/s durante a operação normal do aerogerador.

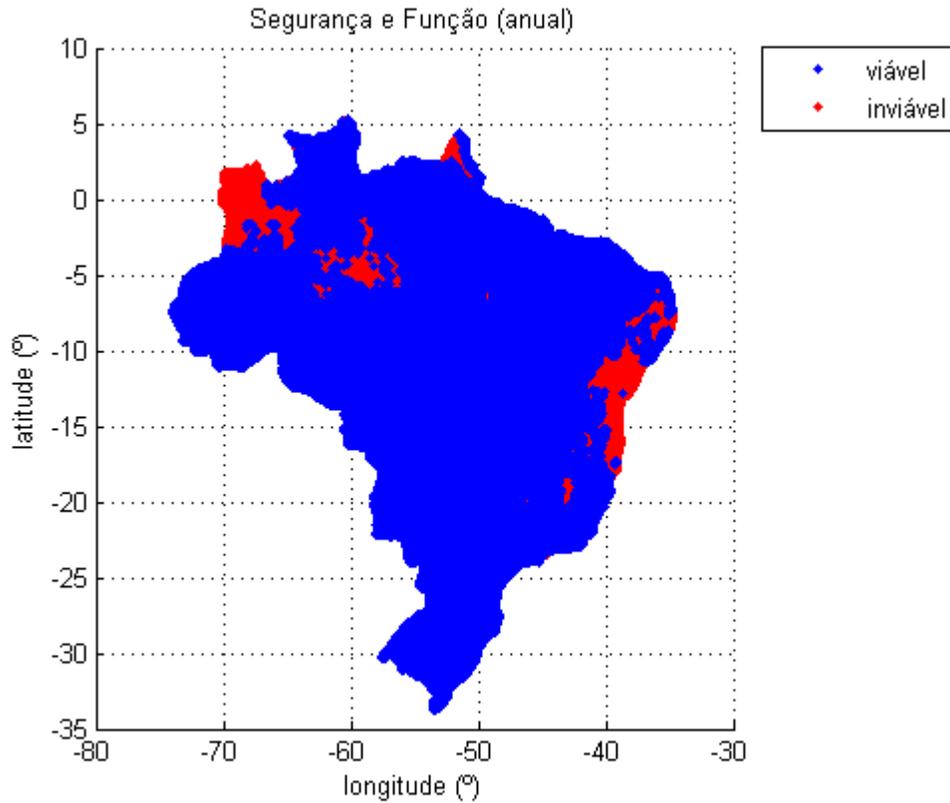
Figura 70. Potenciais locais para áreas de ensaios do ensaio de duração.



6.11 POTENCIAIS ÁREAS DE ENSAIO PARA SEGURANÇA E FUNÇÃO

Como descrito na seleção do par (k, V_m) para este ensaio, ele não contempla uma avaliação por velocidade de vento, sendo assim estipulado uma faixa de velocidades e um critério de corte já apresentado no **Passo 1**. Ou seja, velocidades na faixa de operação das máquinas com menos de 10 minutos de dados anuais foram excluídas, sendo assim as potenciais áreas de ensaio são viáveis em praticamente todo o território nacional como visto na Figura 71. Este pode ser um critério a ser avaliado/inserido em uma futura Norma Nacional para a realização desse ensaio no país. Entretanto, para a identificação de potenciais áreas de ensaio para este ensaio pode ser utilizado o mapa confeccionado para o ensaio de duração, por exemplo, caso não se utilize o critério de velocidades adotado aqui.

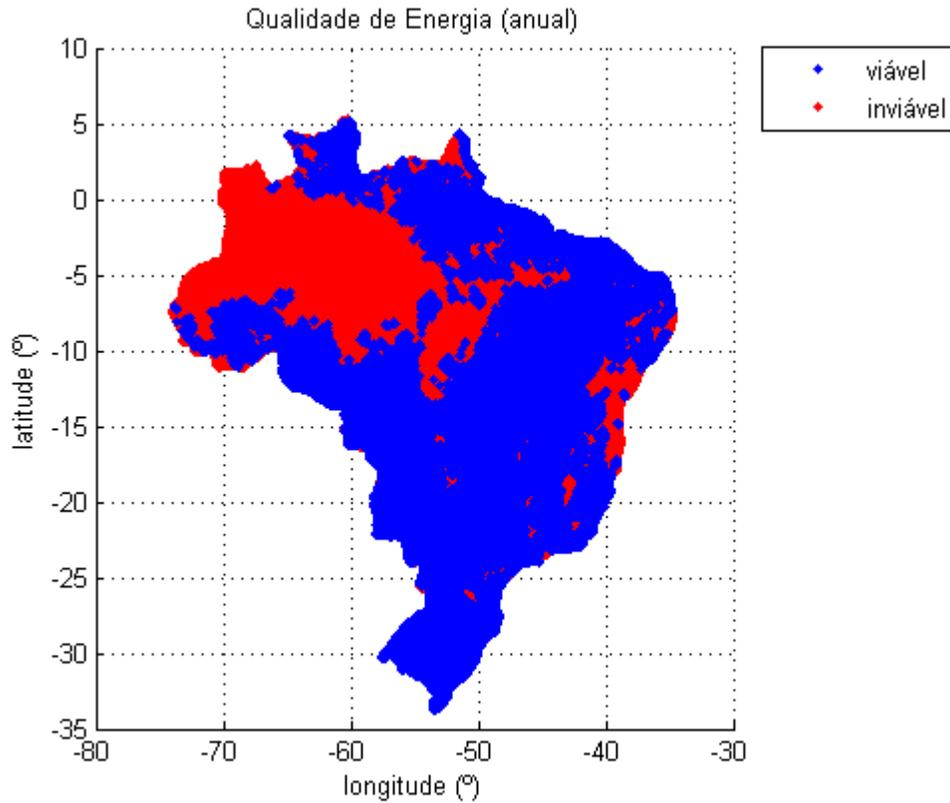
Figura 71. Potenciais locais para áreas de ensaios do ensaio de segurança e função.



6.12 POTENCIAIS ÁREAS DE ENSAIO PARA QUALIDADE DA ENERGIA

A Figura 72 apresenta as potenciais áreas de ensaios para qualidade da energia baseado no critério descrito no APÊNDICE C. Observa-se que, mesmo sendo o ensaio mais restritivo segundo os dados utilizados, a maior parte do país pode abrigar o local para a realização desse ensaio.

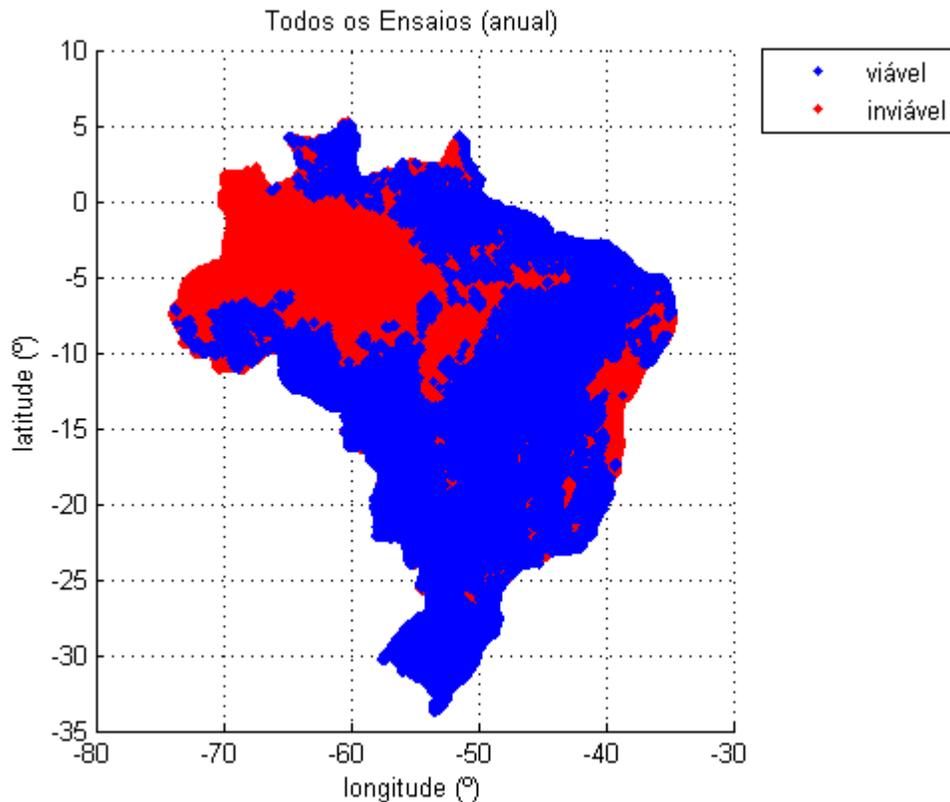
Figura 72. Potenciais locais para áreas de ensaios do ensaio de qualidade da energia.



6.13 POTENCIAIS ÁREAS PARA REALIZAR TODOS OS ENSAIOS

A Figura 73 concatena os mapas confeccionados para os demais ensaios. Para este caso, avaliando apenas esse mapa, ter-se-á uma ideia geral de potenciais áreas de ensaios para todos os ensaios. Nota-se também que grande parte da região nordeste é viável para receber uma área de ensaios completa para aerogeradores de pequeno porte.

Figura 73. Potenciais locais para áreas de ensaios de todos os ensaios apresentados.



6.14 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA – ESTUDO DE CASO 1

Este **Estudo de Caso 1** tem por objetivo validar a Metodologia desenvolvida neste trabalho. A validação consiste em comparar os resultados obtidos no Projeto PILACAS (dados medidos) (ALVAREZ, 2013; DA SILVA, 2015) com os da aplicação da Metodologia (combinação de pares k e V_m) para o mesmo local mostrando quais os ensaios são possíveis.

O Projeto PILACAS foi descrito no **Capítulo 3**. Primeiramente, será realizada uma análise para mostrar a compatibilidade do local comparando os dados medidos com os dados do mapa utilizado e descrito na Metodologia (**Capítulo 5**), evidenciando que as características de vento do local (ALVAREZ, 2013) são compatíveis com as do mapa eólico utilizado neste trabalho. Alvarez (2013) mostrou, através da análise dos dados medidos na área do PILACAS durante dois anos, que o fator de forma de Weibull do local do PILACAS foi de $k \approx 2,6$ e $V_m \approx 4,6$ m/s a 40 m de altura em relação ao nível do solo, como apresentado na Tabela 13. Daí, observou-se que o valor de k do

local do PILACAS estão coerentes com o valor da característica de vento do mapa ($k=2,6$), Figura 74.

Tabela 13. Valores obtidos através da análise dos dados do PILACAS.

Parâmetro	Média de 10 min
Velocidade média (m/s)	4,58
Velocidade máxima (m/s)	12,46
Desvio padrão	1,92
k	2,57
c (m/s)	5,16
Ângulo médio de direção	112,1

Fonte: (ALVAREZ, 2013, p. 52).

Em seguida, com os resultados obtidos da Metodologia, verifica-se que a área do PILACAS está inserida em uma célula 10 x 10 km do mapa que corresponde à localização em graus decimais (-8,33, -35,06), Figura 74. Confrontando-se essas coordenadas com os dados gerados pelo programa (mapas de cores das potenciais áreas de ensaios, ANEXO D), observa-se que os ensaios viáveis nessa localização são os de desempenho de potência (ensaio 2), Figura 67, o de ruído acústico, Figura 69, e atinge os critérios 2, 3 e 4 do ensaio de duração (APÊNDICE C). Porém, o ensaio de desempenho de potência pode ser extrapolado, fazendo com que a área seja permissível para este ensaio por este critério e se retirado o critério 5 de duração (adaptando-se para a realidade local), este torna-se permissível.

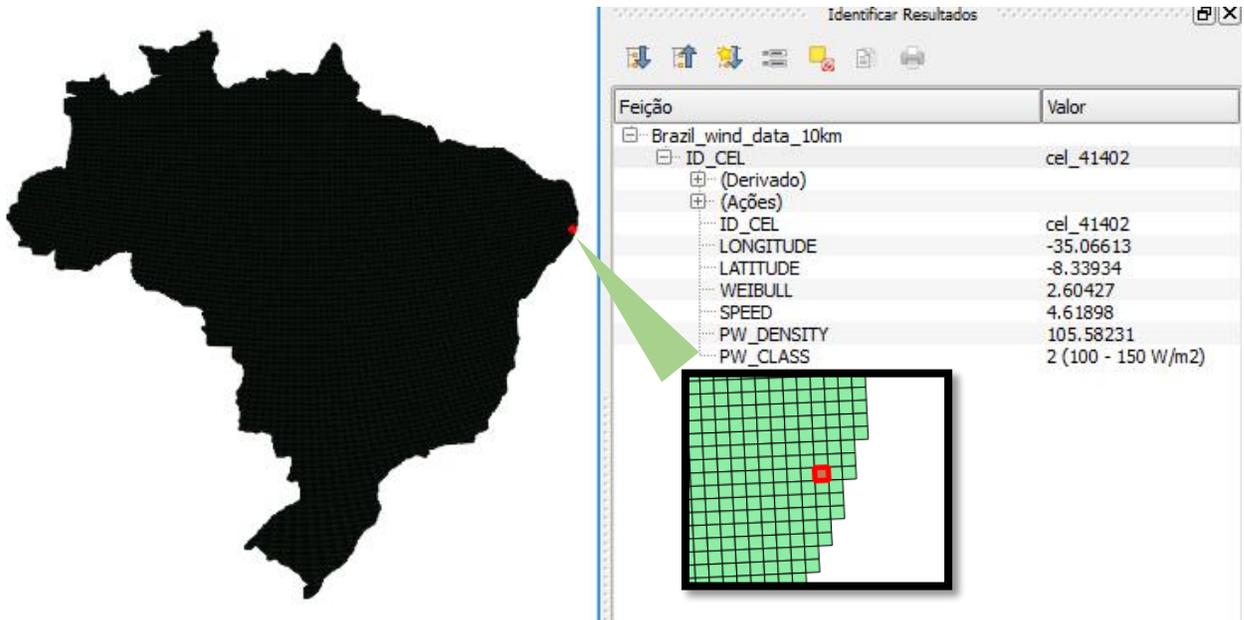
Assim, os resultados apresentados no Projeto PILACAS (**Capítulo 3**) vão ao encontro dos resultados apresentados com a aplicação da metodologia no local, ou seja, o local não é indicado pelo critério de velocidade para todos os ensaios de aerogeradores descritos nesse trabalho no APÊNDICE C, porém, analisando-se outras possibilidades a área pode tornar-se viável para alguns ensaios como os de **duração** (retirando-se o critério 5), **desempenho de potência** (extrapolando) e **segurança e função**, que são os mais importantes. A Tabela 14 resume essas informações.

Tabela 14. Comparativo dos ensaios PILACAS – Metodologia.

Ensaio	PILACAS	Metodologia
Duração	✓	✓
Desempenho de Potência	✓	✓
Segurança e Função	✓	✓

Fonte: o autor.

Figura 74. Localização da célula que contém a área do Projeto PILACAS.



Fonte: (QGIS, 2017) e (CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

6.15 SELEÇÃO DE UM LOCAL PARA A ÁREA DE ENSAIOS – ESTUDO DE CASO 2

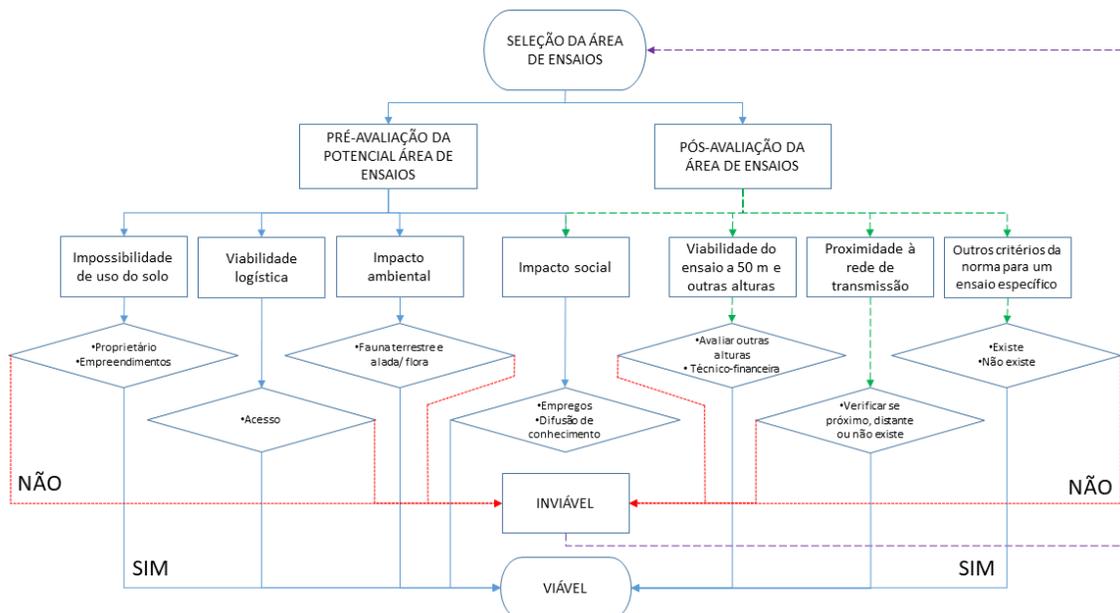
Este trabalho foi desenvolvido para os critérios de velocidade de vento, principal variável, cabendo ser observados outros critérios após a seleção do local como:

- **Impossibilidade de uso do solo** – avaliar se o proprietário da terra estará de acordo com o uso do solo para tal fim; terreno rochoso pode tornar o local inviável; verificar se a área pode ser liberada para construção de empreendimentos;
- **Viabilidade logística** – avaliar o acesso ao local e se há veículo adequado para transporte de equipamentos;
- **Impacto ambiental** – avaliar o impacto sobre a fauna/flora terrestre e alada;
- **Impacto social** – empregabilidade e difusão de conhecimento local;

- **Proximidade à rede de transmissão** – despachar a energia excedente produzida ou até mesmo realizar ensaios diretamente na rede;
- **Viabilidade do ensaio a 50 m e outras alturas** – avaliar se para essa altura é viável economicamente e outras alturas se o vento é favorável;
- **Outros critérios da norma para um ensaio específico** – avaliar se há outros critérios descritos na Norma além dos utilizados/mencionados.

A Figura 75 mostra o fluxograma desses critérios para seleção da área de ensaios (ANEXO E).

Figura 75. Fluxograma da avaliação dos critérios para a seleção da área de ensaios.



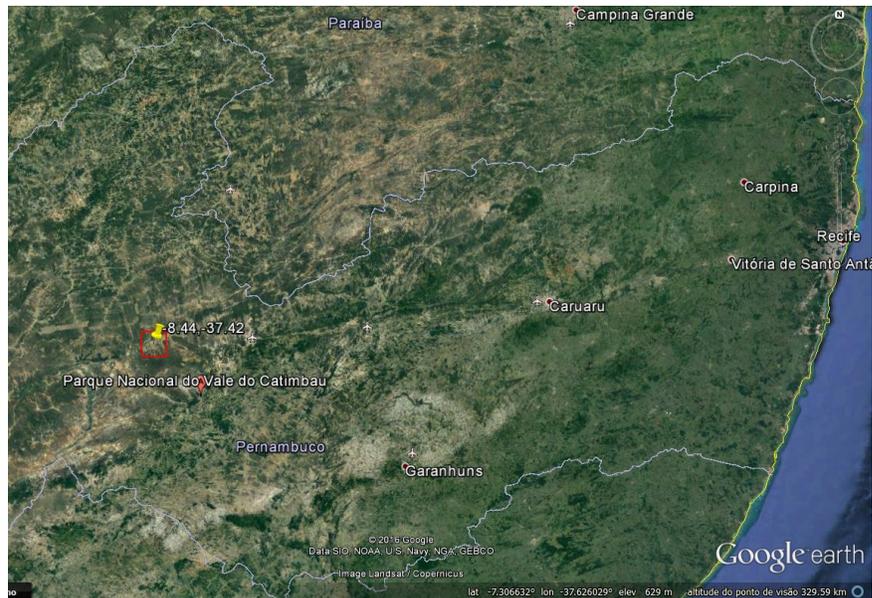
Fonte: o autor.

Assim, pode-se realizar um estudo de caso por análise de outros critérios, além do da velocidade do vento, simulando uma situação real. Este estudo de caso terá por base os dados do mapa da Figura 73 que identifica os pares k e V_m e o potencial local para uma área que possibilita todos os ensaios de APPs descritos nesse trabalho. Será analisada a viabilidade desses ensaios na região Nordeste do Brasil, especificamente no estado de Pernambuco.

Para o exemplo, serão utilizados os dados de latitude e longitude de um par viável do Mapa Eólico e verificado essa localização através de um mapa territorial, no caso, o Google Earth® será utilizado para identificar o local.

O local selecionado em graus decimais foi (-8,44, -37,42) em Moderna-PE, próximo ao município de Arcoverde-PE, como mostra a Figura 76. Pela metodologia, esse local é propício à realização de todos os ensaios pelo critério da velocidade, Figura 77. Porém, ir-se-á verificar a sua viabilidade através dos critérios apresentados.

Figura 76. Localização da área de ensaios para o estudo de caso.



Fonte: (GOOGLE EARTH, 2017).

Figura 77. Mapa da Figura 73 superposto no Google Earth®.



Fonte: Adaptado de (GOOGLE EARTH, 2017).

A área delimitada na Figura 77 corresponde à mesma área do Mapa Eólico apresentado no **Capítulo 6**, ou seja, 10 x 10 km centrado na localização. Vale lembrar que uma área de ensaios de referência é a do NWTC que é cerca de 1 x 1 km, ou seja, dentro da área proposta podem conter cerca de 100 áreas de ensaios do porte da do NWTC, sendo a metodologia melhor aplicada em um mapa com maior resolução espacial. A Figura 78 é uma ampliação do local mostrando que a área selecionada é atravessada pela BR 110 a situada 300 km da capital (Recife-PE), ou seja, o **critério de viabilidade logística** pode ser atendido.

Figura 78. Localização da área de ensaios ampliada para o estudo de caso.



Fonte: (GOOGLE EARTH, 2017).

As Figuras 79 até a Figura 83 mostram a variação do terreno pelo Google Earth Pro®. Observou-se a variação em quatro direções. O maior desnível encontrado nas configurações apresentadas foi de quase 200 m (Figura 82). Nota-se que esse valor é devido à cadeia de montanhas, medido a partir do pico de uma delas. Assim, esses desníveis podem tornar proibitiva a utilização dessa área para os ensaios. Ou seja, o critério de **impossibilidade de utilização do solo** na área selecionada pode não ser atendido. Porém, conforme já foi dito, essa área pode ser reduzida (2 x 2 km, ou 1 x 1 km) tornando viável sua utilização como área de ensaios. Cabe avaliação *in loco*. Em relação também ao critério **impossibilidade de utilização do solo** cabe saber se o proprietário

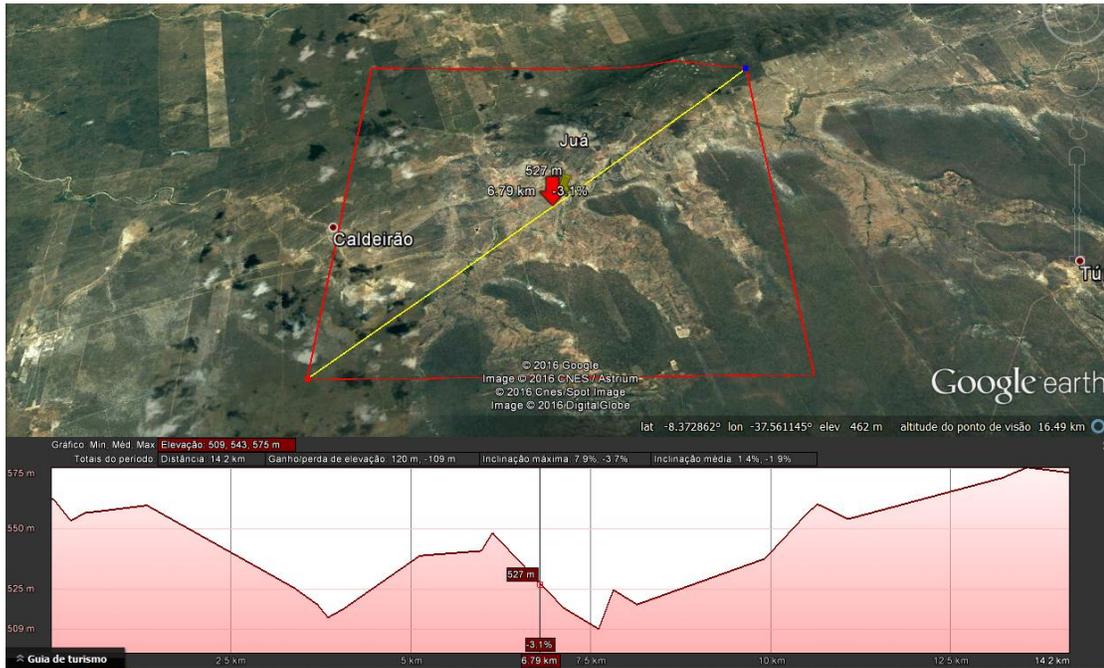
do terreno estará de acordo do uso do solo para tal fim (liberação do terreno), ou se é um terreno rochoso ou uma área de proteção ambiental (APA), por exemplo. Observa-se que aumentando a resolução do terreno, Figura 83, a variação máxima é de apenas 11 m (avaliando-se apenas na direção mostrada, SO→NE).

Figura 79. Variação do terreno na direção Noroeste-Sudeste.



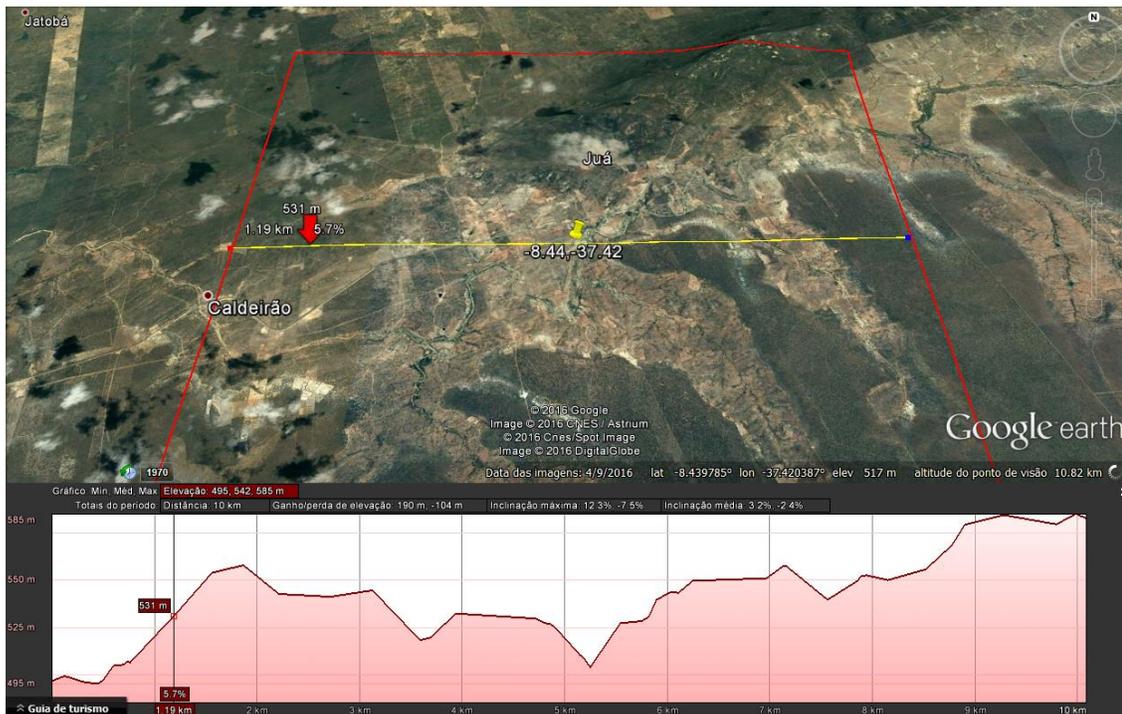
Fonte: (GOOGLE EARTH, 2017).

Figura 80. Variação do terreno na direção Nordeste-Sudoeste.



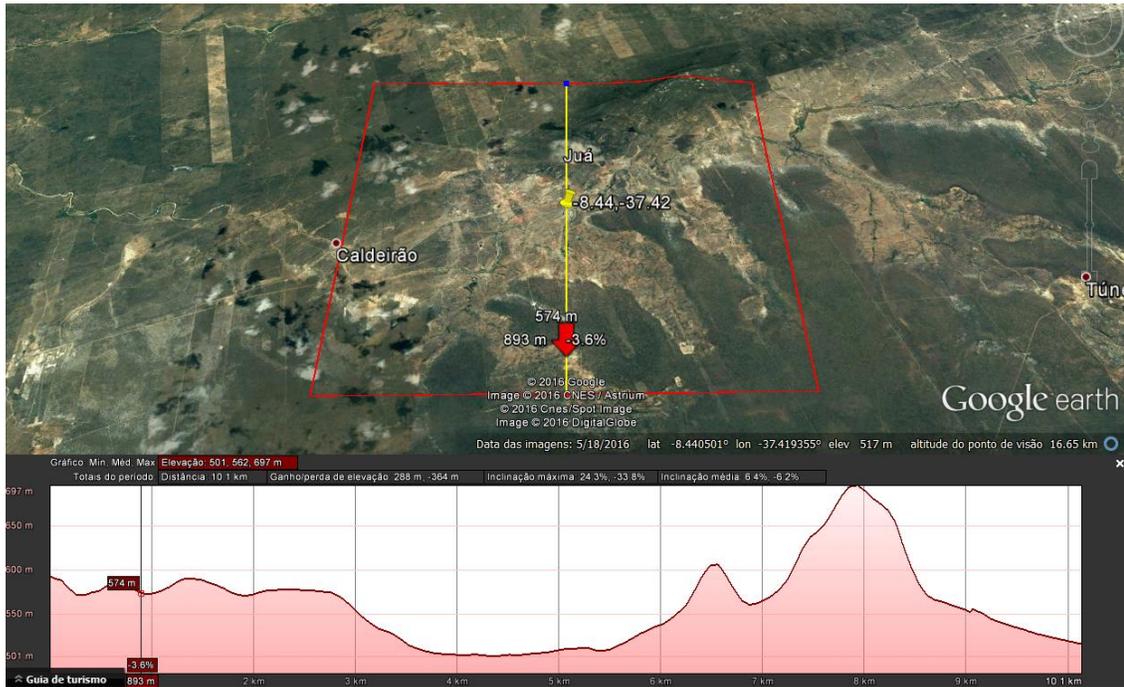
Fonte: (GOOGLE EARTH, 2017).

Figura 81. Variação do terreno na direção Oeste-Leste.



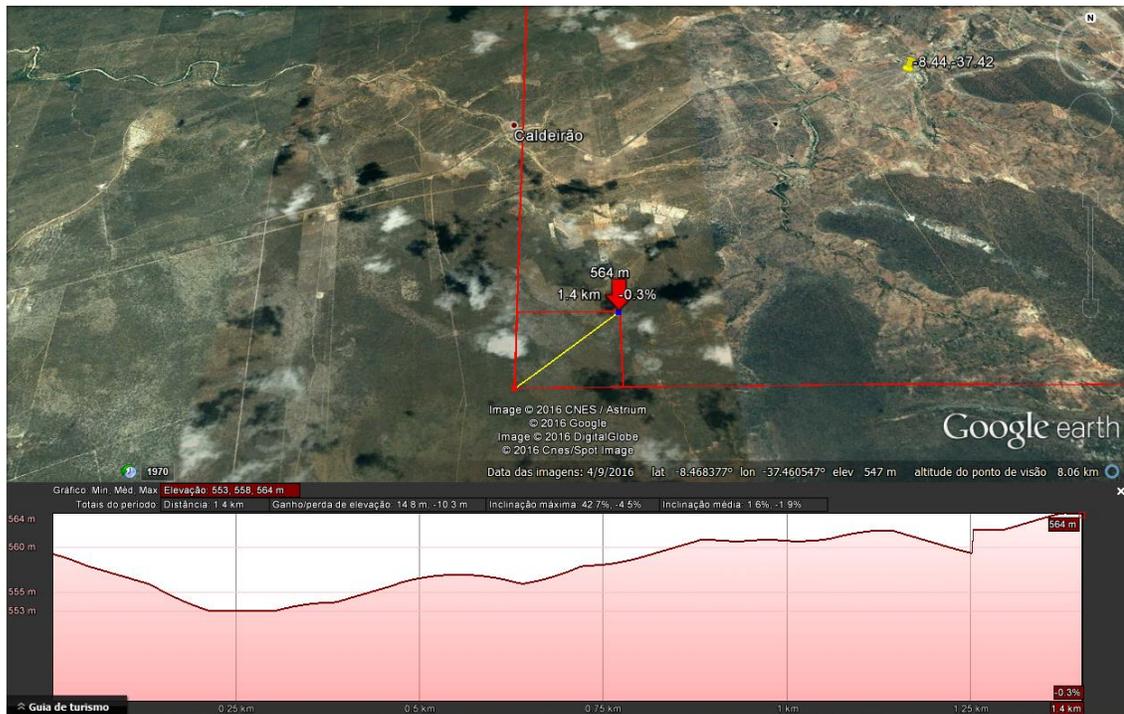
Fonte: (GOOGLE EARTH, 2017).

Figura 82. Variação do terreno na direção Norte-Sul.



Fonte: (GOOGLE EARTH, 2017).

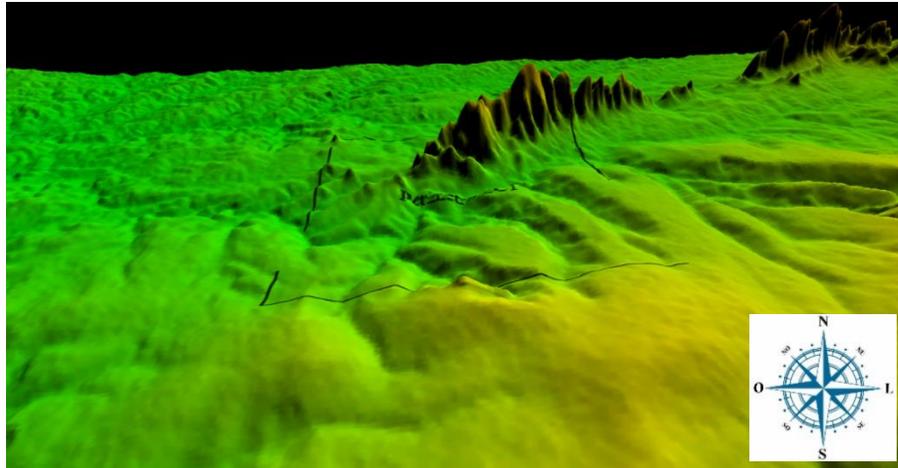
Figura 83. Variação do terreno na direção Nordeste-Sudoeste na célula reduzida (1x1 km).



Fonte: (GOOGLE EARTH, 2017).

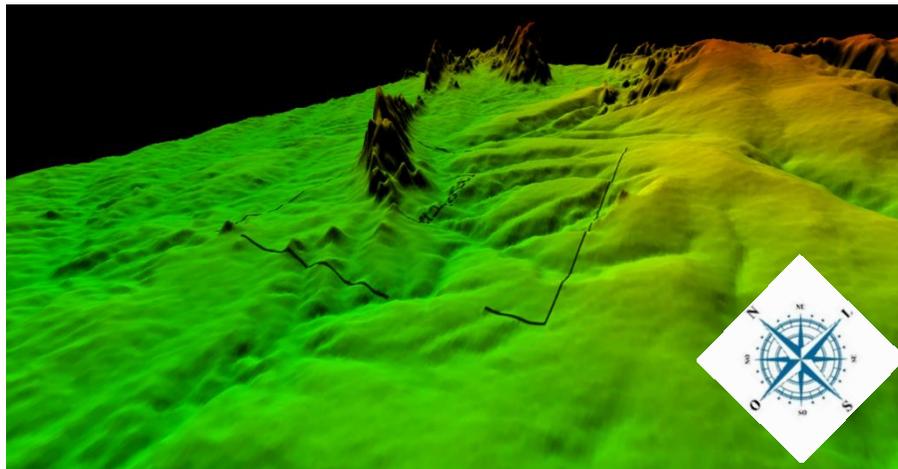
As Figuras 84 a 87 mostram um detalhamento da orografia local utilizando dados de SRTM (MIRANDA, 2005). As Figuras 84 e 85 estão aumentadas 9 vezes para uma melhor visualização e foram processadas no *software* Global Mapper®. Nota-se que a Figura 85 (Sudoeste-Nordeste) há uma canalização que pode ser favorável à incidência de ventos no local demarcado.

Figura 84. Visão do relevo da potencial área de ensaios (Sul-Norte).



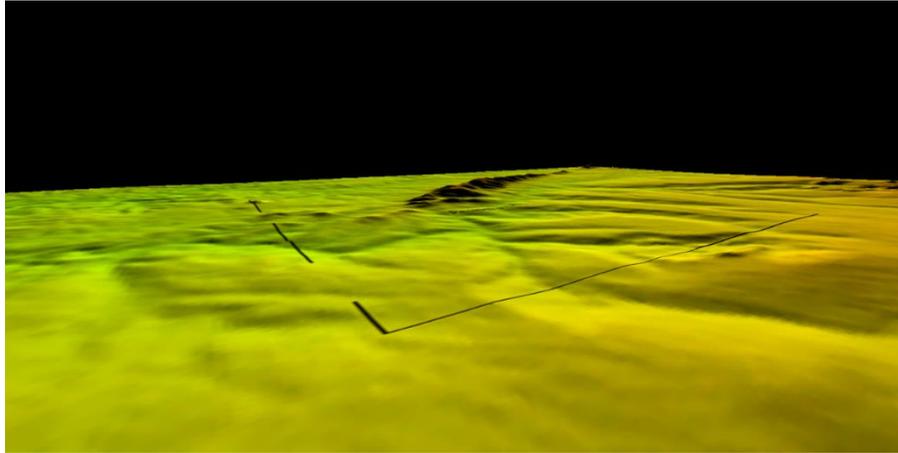
Fonte: o autor.

Figura 85. Visão do relevo da potencial área de ensaios (Sudoeste-Nordeste).



Fonte: o autor.

Figura 86. Visão do relevo da potencial área de ensaios (Sudoeste-Nordeste) sem aumento de relevo.



Fonte: o autor.

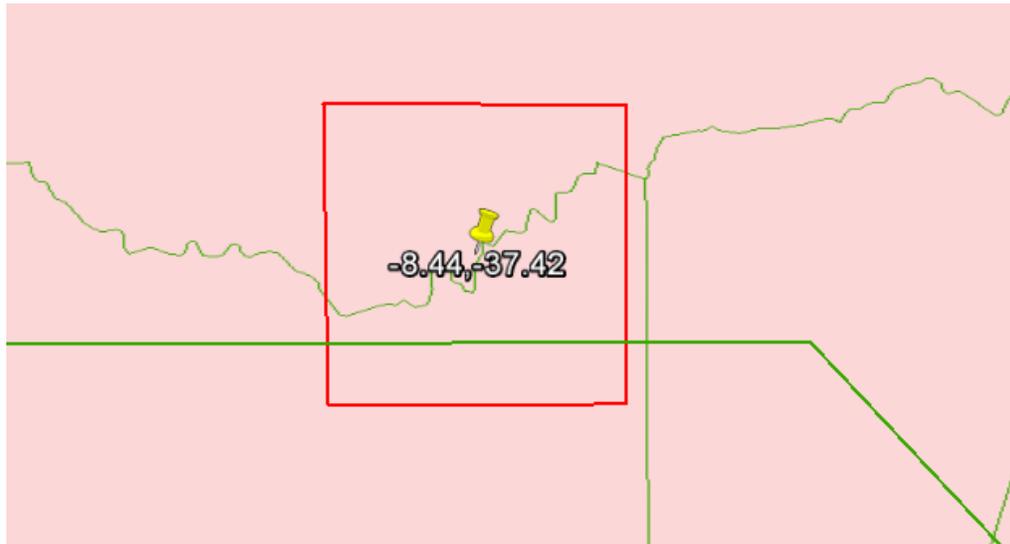
Figura 87. Visão da estrada da potencial área de ensaios.



Fonte: (GOOGLE EARTH, 2017).

A Figura 88 foi construída a partir dos dados do SIGEL da ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016) que são arquivos em formato KML (*Keyhole Markup Language*) interpretadas no *software* Google Earth®, onde mostra o sistema de transmissão de 230 kV (linha reta) passando através da área demarcada. Sendo assim, pelo critério de **proximidade à linha de transmissão** esse local é favorável à instalação da área de ensaios.

Figura 88. Rede de transmissão passando pela potencial área de ensaios.



Fonte: (GOOGLE EARTH, 2017) e (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016).

Quanto aos critérios de **impactos ambiental e social**, é preciso avaliar migração de rota de animais alados (pássaros, morcegos etc.) e área de preservação ambiental. Em relação ao impacto social, possivelmente irá gerar empregos durante e depois da implantação da área além de agregar conhecimento à população local e vizinha, pois, será um local de visitação para estudantes e/ou público em geral.

Em rela o ao critério **viabilidade do ensaio a 50 m**, tem que se avaliar técnica e economicamente a realiza o do ensaio a essa altura, porém não inviabiliza a área de ensaios. É preciso avaliar outras alturas mais baixas e verificar os critérios estabelecidos, inclusive o de velocidade do vento.

Em rela o a **outros critérios da norma para um ensaio específico**, por exemplo, tem-se o caso do ensaio de desempenho de potência já mencionado, onde pode ser extrapolado e comparado com os dados de produ o estimados para completar a curva de potência da máquina ensaiada.

Assim, pelo critério de velocidade de vento a área   viável para todos os ensaios descritos nesse trabalho. Pelos critérios estabelecidos nesta se o, a área pode não ser viável se avaliado todos os critérios simultaneamente.

Vale lembrar que está se estudando a área correspondente a 10 x 10 km e que uma das sugestões de trabalhos futuros é justamente aplicar essa metodologia em um mapa com uma resolução espacial mais alta (1 x 1 km, por exemplo), podendo esta área tornar-se viável aplicando-se os critérios estabelecidos nesta seção, como mostrado na Figura 83.

6.16 RESUMO DO CAPÍTULO 6

As simulações foram realizadas em duas partes: a primeira, onde foi verificada a viabilidade do par k e V_m para os ensaios descritos no **Capítulo 6**; e a segunda parte, onde foram confrontados os pares viáveis com os pares k e V_m do atlas eólico do país a 50 m, identificando assim as potenciais áreas de ensaios nessas condições.

Na primeira parte, os resultados das simulações mostraram que para grande parte do território nacional os ensaios analisados são viáveis para o par de entrada k e V_m , sendo o ensaio de duração o mais restritivo, fazendo com que um local para a realização de todos os ensaios simultaneamente seja restringido, como mostra a Figura 66.

Na segunda parte, a viabilidade dos ensaios da primeira parte foi evidenciada na forma de mapa, cujo objetivo é visualizar/selecionar as potenciais áreas de ensaios no território nacional, sendo as áreas possíveis as na cor azul (região mais escura do mapa), como mostrado na Figura 73. Observou-se que na maior parte do território os ensaios são factíveis.

No mais, neste capítulo foram realizados dois estudos de caso que mostram a utilização concreta da metodologia. Assim, no **Estudo de Caso 1** ficou evidenciado que a metodologia é consistente, pois, os resultados obtidos coincidiram com os resultados obtidos/medidos no Projeto PILACAS. No **Estudo de Caso 2** foi analisado um cenário de situação real, selecionando um local para a área de ensaios utilizando multicritérios além do da velocidade do vento.

7 CONCLUSÕES

Esta tese apresentou uma metodologia pioneira e de caráter probabilístico para identificação de potenciais áreas de ensaios para aerogeradores, motivada pela necessidade de se criar uma área no território brasileiro para certificação e desenvolvimento da tecnologia eólica, pela ausência de uma metodologia para tal fim e outros motivos já descritos.

Apesar de a tese evidenciar aerogeradores de pequeno porte, sua história, evolução para geração de eletricidade e processos de certificação, a metodologia pode ser aplicada também para verificar viabilidades de ensaios e áreas de ensaios para aerogeradores de grande porte, modificando alguns parâmetros no *script* de acordo com as Normas apropriadas. Além do que, essas Normas precisam ser revistas para a situação climática local reforçando a necessidade de uma Norma Nacional que regule os ensaios de aerogeradores concomitante à área de ensaios.

Não obstante, este trabalho cumpriu os objetivos propostos:

- Levantou informações de áreas de ensaios/testes e organismos certificadores de aerogeradores de pequeno porte no mundo;
- Descreveu a experiência obtida com o comissionamento do Projeto PILACAS e evidenciou os trabalhos oriundos desse Projeto;
- Descreveu e analisou os resultados da aplicação da metodologia desenvolvida nesta tese no **Capítulo 6**;
- Elaborou um documento que poderá contribuir para início do processo de normatização para certificação nacional de pequenos aerogeradores, sendo este documento a própria tese.

Os resultados apresentados no **Capítulo 6** são uma forma de concretizar/visualizar a Metodologia, ideia central do trabalho. Porém, os resultados são adaptáveis dependendo dos parâmetros de entrada, preservando a Metodologia. Os dados utilizados neste trabalho, para confronto dos

pares k e V_m , foram os dados do mapa eólico do país que contém essas informações. Entretanto, para se obter mais resultados são necessários mais dados, ainda em deficiência, como segue:

1. Dados de medições meteorológicas em várias alturas para se obter a rugosidade do terreno e a estabilidade atmosférica do local (magnitude e direção do vento, temperatura e pressão) para confeccionar um outro mapa eólico (que pode ser objeto de outra tese ou de um projeto);
2. Dados medidos e registrados, ou disponíveis, em escala temporal reduzida (1 ou 10 minutos, ou ainda horários) para estudar casos em bases temporais mais curtas (6 meses por exemplo), para verificar a celeridade do processo dos ensaios, com a aplicação desses dados no item acima;
3. Mapa eólico com maior resolução espacial e que contenham os dados de k e V_m .

Apesar de o valor de k ideal para áreas de ensaios ser 2, devido à variabilidade do vento em relação ao valor médio abrangendo assim uma maior faixa de velocidades do vento (APÊNDICE B), a Metodologia mostra a viabilidade dos ensaios para valores de k elevados ($k \geq 3$), permitindo que a região Nordeste do Brasil contemple um centro para ensaios e testes de aerogeradores, além de se ter uma localização favorável à logística. Vale lembrar que no Nordeste há locais com $2 \leq k \leq 3$, e cujo valor médio é de 3,5.

Além da metodologia apresentada, em consequência uma análise das características de vento através de gráficos e um resultado de identificação de potenciais áreas de ensaios para aerogeradores de pequeno porte no território nacional através de mapas, foi desenvolvido também um *script* em MatLab® como produtos desse trabalho. O trabalho evidenciou também a necessidade de se criar uma Norma Nacional, como modificação ou exclusão de alguns critérios de velocidades que não se aplicam à totalidade do país (no caso o critério 5 do ensaio de duração, APÊNDICE C, por exemplo), bem como a utilização de Weibull em vez de Rayleigh para o ensaio de desempenho de potência (APÊNDICE A), visto que o Brasil tem características de vento distintas dependendo da região, em particular a Nordeste com k médio de 3,5. Não obstante,

gerou um apanhado de informações que estavam fragmentadas sobre aerogeradores de pequeno porte, áreas de ensaios e certificadoras.

Através de dois estudos de caso foi demonstrado a validação e aplicação da metodologia. O primeiro com o intuito de validar a metodologia, já que este foi realizado comparando com dados locais medidos. Evidenciou-se nesse estudo que a Metodologia é consistente já que os resultados obtidos através de sua utilização vão ao encontro dos estudos realizados anteriormente para a área do Projeto PILACAS, como os de Alvarez (2013) e da Silva (2015).

O segundo estudo de caso demonstrou uma situação real, cujo cenário foi selecionar uma área de ensaios através das informações geradas pela aplicação da Metodologia utilizando-se outros critérios além da velocidade do vento. Este estudo mostrou de forma efetiva como selecionar uma área de ensaios. Assim ficou evidenciada a validação e aplicabilidade da Metodologia proposta, cumprindo-se o objeto principal do trabalho.

Por fim, este trabalho ajudará no processo de desenvolvimento tecnológico do país no âmbito de se identificar/selecionar um local para a primeira área de ensaios e testes no Brasil, e que pode abranger todo um continente, para certificação e desenvolvimento da eólica assim como contribuir para o início do processo de normatização Nacional.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Implementar no *script* alturas de 30, 20 e 10 m, ou a que se desejar, utilizando algum método de extrapolação vertical e se considerando a estabilidade atmosférica;
- Identificar na unidade espacial, considerada neste estudo de caso (10x10 km), as informações de latitude e longitude para localização mais precisa;
- Redefinir o mapa destacando a região nordeste do Brasil;
- Aplicar os dados com uma maior resolução espacial;
- Separar em bases temporais semestrais (Jan-Jun; Fev-Jul, por exemplo) para verificar a viabilidade dos ensaios em períodos mais curtos, ou até mesmo outras bases temporais;

- Modificar alguns critérios estabelecidos conforme necessidade (grande porte, por exemplo);
- Confeccionar/obter um Mapa Eólico mais preciso e que contenham as informações necessárias para aplicação da metodologia.

7.2 TRABALHOS PUBLICADOS (2013-2017)

7.2.1 Periódicos indexados

1. **Oyama Douglas Q. de Oliveira Filho**, Wênio Fhará A. Borges, Antônio M. Soares Júnior, Gilberto M. de Melo, Janardan S. Rohatgi, Alex Maurício Araújo. Analysis of Wind Data Measured Simultaneously of Two Widely Separated Sites in Brazil: Trade-Winds and Westerlies Wind Regimes. *International Journal of Green Energy*, **Artigo submetido**, 2017, Under Review. *Qualis CAPES: B1*.
2. Medeiros, A. L.R.; ARAUJO, A. M.; **OLIVEIRA FILHO, O. D. Q.**; J. S. ROHATGI. Defining Capacity Factor by Weibull shape Parameter and Mean Wind Speed. *Wind Engineering*, v. 39, p. 253-260, 2015. *Qualis CAPES: B2*.
3. Medeiros, A. L.R.; ARAUJO, A. M.; **OLIVEIRA FILHO, O. D. Q.**; ROHATGI, J. S.; SANTOS, M. J.. Analysis of design parameters of large-sized wind turbines by non-dimensional model. *Energy (Oxford)*, v. 93, p. 1146-1154, 2015. *Qualis CAPES: A1*.
4. JUAREZ, A. A.; ARAUJO, A. M.; **OLIVEIRA FILHO, O. D. Q.**; ROHATGI, JANARDAN. Development of the wind power in Brazil: political, social and technical issues. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 39, p. 828-834, 2014. *Qualis CAPES: A1*.
5. **DOUGLAS QUEIROZ OLIVEIRA, OYAMA**; MAURICIO ARAUJO, ALEX; LUCIO RAMOS MEDEIROS, ARMANDO; PEREIRA SILVA, HELES; SINGH ROHATGI, JANARDAN; ISIAH ASIBOR, AIGBOKHAN. A Preliminary Approach of the Technical Feasibility of Offshore Wind Projects along the Brazilian Coast. *Revista IEEE América Latina*, v. 11, p. 706-712, 2013. *Qualis CAPES: B2*.

6. **DE OLIVEIRA FILHO, OYAMA D. Q.**; ARAÚJO, ALEX M.; ASIBOR, AIGBOKHAN I.; ROHATGI, JANARDAN. Meeting Peak Load Demand by an Offshore Wind Farm in Brazil. *Wind Engineering*, v. 37, p. 549-556, 2013. *Qualis CAPES: B2*.

7.2.2 Anais de Congressos

1. **O. de Oliveira Filho**, A. Araújo, A. Silva, C. Bezerra, C. Santos, E. Fernandes, G. Rocha, L. Andrade, W. Borges, D. Ribeiro. Analysis of Weibull parameters for wind power generation. *Artigo aceito para publicação*, COBEM 2017, Curitiba-Brazil.
2. SILVA, A. A. C.; **DE OLIVEIRA FILHO, OYAMA D. Q.**; ARAUJO, A. M.; SILVA, C. O. G.; FERREIRA, C. R.; ANDRADE, L. I.; ARRUDA FILHO, P. H. C.; SANTANA, G. G. A.. ANÁLISE DAS ATUAIS POLÍTICAS DE INCENTIVO À MINI E MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA E DA CERTIFICAÇÃO DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE NO BRASIL. In: IX Congresso Nacional de Energia Mecânica, 2016, Fortaleza. IX Congresso Nacional de Energia Mecânica, 2016.
3. **OYAMA DOUGLAS QUEIROZ DE OLIVEIRA FILHO**; ALEX MAURÍCIO ARAÚJO; JANARDAN SINGH ROHATGI; ARMANDO LÚCIO RAMOS DE MEDEIROS; AIGBOKHAN ISAIHAH ASIBOR; NAEVIO MENDONÇA REZENDE NETO; GILBERTO MARTINS DE MELO; LUCAS IOLANDA DE ANDRADE; GUILHERME SANTIAGO MENDES CANTALICE; GUILHERME JOSÉ ARRUDA MOURA ROCHA. A preliminary approach for wind turbine selection in a specific wind regime. In: 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2015, Rio de Janeiro. v. 23.
4. **OYAMA DOUGLAS QUEIROZ DE OLIVEIRA FILHO**; HELES PEREIRA DA SILVA; ALEX MAURÍCIO ARAÚJO; JANARDAN SINGH ROHATGI; GILBERTO MARTINS DE MELO; CARLOS DE VASCONCELOS DUTRA JUNIOR; NAEVIO MENDONÇA REZENDE NETO; MARCOS ANDRÉ DE ALMEIDA DA SILVA; RAUL CESAR BATISTA DE MORAES; RODRIGO RIBEIRO MORCOURT DE FREITAS. Survey of electric power curve in small wind turbine based on IEC 61400-12-1. In: 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2015, Rio de Janeiro. v. 23.

5. Medeiros, A. L.R.; ARAUJO, A. M.; **OLIVEIRA FILHO, O. D. Q.**; ISIAH ASIBOR, AIGBOKHAN; OLIVEIRA, L. A.; MELO, G. G. M.; ESPINDOLA, R. L.; SILVA, M. A. A.; VITAL, B. C.; MACHADO, H. C. M.. ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS RELATED TO THE CAPACITY FACTOR. In: COBEM, 2013, Ribeirão Preto/SP. 22^o International Congress of Mechanical Engineering, 2013.
6. MELO, G. G. M.; OLIVEIRA, L. A.; ARAUJO, A. M.; ASIBOR, AIGBOKHAN I.; Medeiros, A. L.R.; **OLIVEIRA FILHO, O. D. Q.**; ESPINDOLA, R. L.; MACHADO, H. C. M.; JAOUEN, P.; NOGUERA, R. E.. APPLICATION OF GOOD CFD SIMULATION PRACTICES TO S814 AIRFOIL PROFILE. In: COBEM, 2013, Ribeirão Preto/SP. 22^o International Congress of Mechanical Engineering, 2013.

REFERÊNCIAS

ABNT. **Medições do desempenho de potência de aerogeradores**. ABNT NBR IEC 61400-12-1. Rio de Janeiro, p. 104. 2012.

ABNT NBR IEC. **Power performance measurements of electricity producing wind turbines**. ABNT NBR IEC 61400-12-1. Rio de Janeiro, p. 96. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Sobre energia eólica. **Site da ANEEL**, 2005. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf)>. Acesso em: 31 Março 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Sobre a Agência Nacional de Energia Elétrica. **Site da ANEEL**, 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 24 Março 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. SIGEL - Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico. **ANEEL**, 2016. Disponível em: <<https://sigel.aneel.gov.br/kmz.html>>. Acesso em: 31 Janeiro 2017.

ALÉ, J. A. V. Open Dialogue, Certification Small Wind Generators. **Workshop de Geração Eólica Distribuída**, Rio de Janeiro, 27 e 28 Agosto 2012. 4.

ALL SMALL WIND TURBINES. Sobre Aerogeradores de pequeno porte. **Site da All Small Wind Turbines**, 2015. Disponível em: <<http://www.allsmallwindturbines.com/>>. Acesso em: 24 Março 2016.

ALLIANCE FOR RURAL ELECTRIFICATION. **The potencial of small and medium wind energy in developing countries**. Renewable Energy House. Brussels, p. 12. 2012.

ALONÇO, A. D. S. **Ensaio, Experimentação e Pesquisa em Mecanização Agrícola**. UFSM/CCR/DER. Santa Maria, p. 13. 2002.

ALTIN, M. et al. **Technical Feasibility of Ancillary Services provided by ReGen Plants**. Technical University of Denmark. [S.l.], p. 37. 2015.

ALVAREZ, F. S. **Desenvolvimento de um sistema computacional para gerenciamento e análise de dados eólicos**. UFPE. Recife, p. 93. 2013. Dissertação de Mestrado PPGEM-UFPE.

ALVAREZ, F. S. et al. Uma ferramenta computacional para análise de dados eólicos. **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, São Luís, 31/07 a 03/08 Agosto 2012. 7.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, p. 9. 2012.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de Novembro de 2015**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, p. 26. 2015.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Notícias**, 2016. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=9086&id_area=90>. Acesso em: 04 Outubro 2016.

ATLANTIC WIND TEST SITE. Sobre ensaios de aerogeradores. **Site do governo canadense**, 1999. Disponível em: <http://www.gov.pe.ca/photos/original/wind_test_site.pdf>. Acesso em: 08 Abril 2016.

CANO, L. et al. **EXPERIMENTAL RESULTS OBTAINED IN SMALL WIND TURBINES TEST PLANT. NEW PROPOSALS FOR THE MEASUREMENTS**. CIEMAT. Madrid, p. 7. 2009.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. Brazil Wind Data 10 km. **OpenEI**, 2008. Disponível em: <<https://en.openei.org/datasets/dataset/brazil-wind-data-10km-from-cepel>>. Acesso em: 04 Outubro 2016.

CEPEL. Novo Atlas Eólico Brasileiro (Simulações 2013). **CEPEL**, 2017. Disponível em: <<http://novoatlas.cepel.br/>>. Acesso em: 14 Setembro 2017.

CIEMAT. CIEMAT. **Presentación**, 2016a. Disponível em: <<http://www.ciemat.es/portal.do;jsessionid=EFBAD17266BF303F1235531F9A444760?IDM=6&NM=1>>. Acesso em: 12 Fevereiro 2016.

CIEMAT. CIEMAT. **Energías renovables y ahorro energético**, 2016b. Disponível em: <<http://www.ciemat.es/cargarAreaInvestigacion.do?identificador=1>>. Acesso em: 12 Fevereiro 2016.

CIEMAT. CIEMAT. **Energías renovables y ahorro energético / Energía eólica**, 2016c. Disponível em: <<http://www.ciemat.es/cargarLineaInvestigacion.do?identificador=2&idArea=1>>. Acesso em: 12 Fevereiro 2016.

CIEMAT. CIEMAT. **Energías renovables y ahorro energético / Energía eólica / Sistemas eólicos aislados**, 2016d. Disponível em: <<http://www.ciemat.es/cargarSubLineaInvestigacion.do?identificador=2&idArea=1&idLinea=2>>. Acesso em: 12 Fevereiro 2016.

CLASSNK. Certification of Wind Turbine. **ClassNK**, 2016. Disponível em: <http://www.classnk.or.jp/hp/en/authentication/windmill_attestation/index.html>. Acesso em: 29 Abril 2016.

CLEMSON UNIVERSITY. SCE&G Energy Innovation Center. **Site do Clemson University SCE&G Energy Innovation Center**, 2016. Disponível em: <<http://clemsoneenergy.com/>>. Acesso em: 4 Julho 2016.

CRES. **CRES presentation**, 2017. Disponível em: <http://www.cres.gr/kape/present/present_uk.htm>. Acesso em: 20 Março 2017.

CRESESB. Mercado de aerogeradores de pequeno porte no Brasil. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica**, 2015. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/app/>>. Acesso em: 19 Maio 2016.

C-WET. **CENTRE FOR WIND ENERGY TECHNOLOGY (An Autonomous R&D Institution under the Ministry of New and Renewable Energy) GOVERNMENT OF INDIA.** Centre for Wind Energy Tachnology. Chennai, p. 15. 2011.

DA SILVA, H. P. **Levantamento da curva de potência elétrica de aerogerador de pequeno porte baseado na norma IEC 61400-12-1.** UFPE. Recife, p. 65. 2015.

DEVORE, J. L. **Probability and statistics for Engineering and the Science.** 6ª. ed. California: Thomson, 2006.

DNV GL. DNV GL. **Wind Turbine Type Testing,** 2016. Disponível em: <<https://www.dnvgl.com>>. Acesso em: 29 Abril 2016.

DTU. **Ancillary Services from Renewable Power Plants – RePlan Project.** Technical University of Denmark. [S.l.], p. 4. 2016c.

DTU WIND ENERGY. **ØSTERILD NATIONAL TEST CENTRE FOR LARGE WIND TURBINES.** Danmarks Tekniske Universitet. Roskilde, p. 12. 2015.

DTU WIND ENERGY. DTU Wind Energy. **About DTU Wind Energy,** 2016a. Disponível em: <<http://www.vindenergi.dtu.dk/english/About>>. Acesso em: 24 Abril 2016.

DTU WIND ENERGY. DTU Wind Energy. **Østerild - National Test Centre for Large Wind Turbines,** 2016b. Disponível em: <<http://www.vindenergi.dtu.dk/english/About/Oesterild>>. Acesso em: 24 Abril 2016.

DTU WIND ENERGY. DTU Wind Energy. **Test Centre for large wind turbines at Høvsøre,** 2016c. Disponível em: <http://www.vindenergi.dtu.dk/english/About/Hoevsoere_uk>. Acesso em: 28 Abril 2016.

DUTRA, R. M.; PEREIRA , M. G.; MONTEZANO, B. E. M. **Aerogeradores de pequeno porte: percepção dos produtores.** Cepel. Rio de Janeiro, p. 8. 2015.

ECN. **ECN Wind Measurements Services Plus.** ECN Wind Energy. Petten, p. 4. 2014a.

ECN. **ECN Wind turbine Test site Wieringermeer (EWTW)**. ECN Wind Energy Facilities BV. Wieringerwerf, p. 8. 2014b.

ECN. **About ECN**, 2016a. Disponível em: <<https://www.ecn.nl/about-ecn/>>. Acesso em: 25 Abril 2016.

ECN. **Wind Energy technology and knowledge exchange**, 2016b. Disponível em: <<https://www.ecn.nl/energy-research/wind-energy/>>. Acesso em: 25 Abril 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano decenal de expansão de energia 2024**. Empresa de Pesquisa Energética (epe). Rio de Janeiro, p. 467. 2016.

ENERGY RESEARCH CENTRE OF THE NETHERLANDS. **ECN Wind Energy Facilities BV**. Energy Research Centre of the Netherlands. Wieringerwerf, p. 2. 2008.

ENERGY.GOV. **WIND TESTING AND CERTIFICATION**, 2016. Disponível em: <<http://energy.gov/eere/wind/wind-testing-and-certification>>. Acesso em: 31 Maio 2016.

EUROSOLAR. Sobre Commendation Danish Small Wind Turbine Association. **Site da Eurosolar**, 2011. Disponível em: <<http://www.eurosolar.de/en/index.php/commendation-danish-small-wind-turbine-association>>. Acesso em: 06 Abril 2016.

FERREIRA, A. B. D. H. **novo Aurélio Século XXI**. Editora Nova Fronteira. Rio de Janeiro, p. 2128. 1999. 3ª Edição.

FRAUNHOFER IWES. Fraunhofer Iwes. **Innovation with benefits for industry & society**, 2016a. Disponível em: <http://www.windenergie.iwes.fraunhofer.de/en/about_us.html>. Acesso em: 25 Abril 2016.

FRAUNHOFER IWES. Fraunhofer Iwes. **Test centers and measurements**, 2016c. Disponível em: <http://www.windenergie.iwes.fraunhofer.de/en/test_centers_laboratories.html>. Acesso em: 25 Abril 2016.

FÜRSTENAU, E. **Novo Dicionário de Termos Técnicos Vol. 2**. Editora Globo. São Paulo, p. 1413. 1999. 23ª Edição.

GIANNINI, M.; DUTRA, R. M.; GUEDES, V. G. **ESTUDO PROSPECTIVO DO MERCADO DE ENERGIA EÓLICA DE PEQUENO PORTE NO BRASIL**. Brazil Wind Power. Rio de Janeiro: Anais. 03 Agosto 2013. p. 10.

GLOBALDATA. GlobalData. **Global Small Wind Turbines Installed Capacity Will Surge to 4.8 Gigawatts by 2025**, 2015. Disponível em: <<http://energy.globaldata.com/media-center/press-releases/power-and-resources/global-small-wind-turbines-installed-capacity-will-surge-to-48-gigawatts-by-2025-says-globaldata>>. Acesso em: 12 Maio 2016.

GOOGLE EARTH. **Google Earth Pro**. Google. Recife. 2017. (Versão 7.1.5.1557). Software.

GOOGLE MAPS. Google. **Google Maps**, 2013. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/>>. Acesso em: 10 Novembro 2014.

GSÄNGER, S.; PITTELOUD, J. **Small Wind World Report**. World Wind Energy Association (WWEA). Bonn, p. 20. 2014.

GSÄNGER, S.; PITTELOUD, J.-D. **Small Wind World Report**. World Wind Energy Association (WWEA). Bonn, p. 16. 2016.

HANSEN, M. O. L. **Aerodynamics of Wind Turbines**. 2ª. ed. Londres: Earthscan, 2008.

HAU, E. **Wind Turbines**. 2ª. ed. Krailling: Springer, 2005.

HERBERT, G. M. J. et al. A review of wind energy technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Chennai, v. 11, p. 1117–1145, August 2007.

IEC. **Wind turbines – Part 22: Conformity testing and certification**. International Electrotechnical Commission. [S.l.], p. 80. 2010.

IEC. **Wind turbines - Part 2: Small wind turbine**. IEC. Standard preview, p. 23. 2013.

IEC. IEC Webstore. **International Electrotechnical Commission**, 2016. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/searchform&q=61400>>. Acesso em: 30 Maio 2016.

INMETRO. **Portaria nº 168, de 23 de março de 2015**. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Rio de Janeiro, p. 14. 2015.

INTERNAL REVENUE SERVICE. Internal Revenue Bulletin. **IRS**, 2015. Disponível em: <https://www.irs.gov/irb/2015-5_IRB/ar09.html>. Acesso em: 04 Maio 2016.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Policies and regulations for private sector renewable energy mini-grids**. IRENA. Abu Dhabi, p. 112. 2016b. (978-92-95111-46-2).

JAOUEN, P. **Modélisation du vent sur un profile de pôle d'éolienne et sur le relief de la colline de Ipojuca**. UFPE. Recife, p. 38. 2013.

JIMENEZ, et al. **EXPANDING SMALL WIND TURBINE CERTIFICATION TESTING - ESTABLISHMENT OF REGIONAL TEST CENTERS**. National Renewable Energy laboratory. Dallas, p. 1. 2010.

JIMENEZ, T. et al. Establishment of Small Wind Regional Test Centers. **National Solar Conference (Solar 2011)**, Raleigh, 17-21 Maio 2011. 9.

JOHNSON, G. L. **Wind Energy Systems**. Electronic Edition. ed. Manhattan: Kansas State University, 2001.

JONKMAN, J.; VAN DAM, J.; FORSYTH, T. Investigation of the IEC Safety Standard for Small Wind Turbine Design through Modeling and Testing. **ASME Wind Energy Symposium**, Nevada, 6-9 January 2003. 1-14. National Renewable Energy Laboratory (NREL).

KANE. **Demonstration Wind Farm**, 2017. Disponível em: <http://www.creswindfarm.gr/site1/index_en.htm>. Acesso em: 16 Março 2017.

KANE CRES. **Center for Renewable Energy Sources and Saving**, 2017. Disponível em: <http://www.cres.gr/kape/index_eng.htm>. Acesso em: 16 Março 2017.

KANE CRES. **Wind System Laboratories**, 2017. Disponível em: <http://www.cres.gr/kape/present/labs/aiolikwn_uk.htm>. Acesso em: 20 Março 2017.

LYSEN, E. H. **Introduction to Wind Energy**. 2ª. ed. Amersfoort: CWD, 1983.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. 2ª. ed. Washington: John Wiley & Sons Ltd, 2009.

MASSACHUSETTS CLEAN ENERGY TECHNOLOGY. Wind Technology Testing Center. **Site do Massachusetts Clean Energy Technology**, 2016. Disponível em: <<http://www.masscec.com/wind-technology-testing-center>>. Acesso em: 31 Maio 2016.

MCS. Microgeneration Certification Scheme. **MCS**, 2016. Disponível em: <<http://www.microgenerationcertification.org/>>. Acesso em: 28 Abril 2016.

MIRANDA, E. E. Brasil em relevo. **Embrapa Monitoramento por Satélite**, 2005. Disponível em: <<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/pe/pe.htm>>. Acesso em: 21 Fevereiro 2017.

MORAES, R.; ARAÚJO, A. M. **Relatório PIBIC**. UFPE. Recife, p. 23. 2014.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY CENTER. Whisper H-40 Final Report. **Scribd**, 2003. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/204158009/Whisperh40-Power-Performance-Test-Report-900w>>. Acesso em: 17 Janeiro 2017.

NEWS CHANNEL 10. Sobre o encerramento de pesquisas com energia eólica pela USDA. **Site de notícias**, 2011. Disponível em: <<http://www.newschannel10.com/story/15165462/usda-ending-wind-program-in-bushland>>. Acesso em: 11 Abril 2016.

NIWE. National Institute of Wind Energy. **NIWE**, 2015a. Disponível em: <http://niwe.res.in/department_wtt.php>. Acesso em: 25 Maio 2016.

NIWE. National Institute of Wind Energy. **Site do NIWE**, 2015b. Disponível em: <<http://niwe.res.in/>>. Acesso em: 25 Maio 2016.

NIWE. National Institute of Wind Energy. **NIWE**, 2015c. Disponível em: <http://niwe.res.in/departement_wtrs.php>. Acesso em: 25 Maio 2016.

NORDISK FOLKECENTER. **Høvsøre prøvestation for store vindmøller**, 2011. Disponível em: <<http://www.folkecenter.dk/dk/news/int/hoevsore/>>. Acesso em: 4 Julho 2016.

NREL. **SWCC Organizational Survey Summary**, 2006. Disponível em: <http://www.nrel.gov/wind/smallwind/pdfs/swcc_survey.pdf>. Acesso em: 26 Abril 2016.

NREL. **Wind Research**, 2013a. Disponível em: <http://www.nrel.gov/wind/smallwind/independent_testing.html>. Acesso em: 26 Abril 2016.

NREL. Wind Research. **Site do NREL**, 2015. Disponível em: <http://www.nrel.gov/wind/utility_scale_wind.html>. Acesso em: 22 Junho 2016.

NREL. **Wind Research**, 2016a. Disponível em: <http://www.nrel.gov/wind/smallwind/regional_test_centers.html>. Acesso em: 26 Abril 2016.

NREL. Wind Research. **Site do NREL**, 2016b. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/wind/>>. Acesso em: 10 Junho 2016.

PENA. **Welcome to Pena**, 2017. Disponível em: <<http://www.penaproject.gr/index.php?lang=en>>. Acesso em: 20 Março 2017.

PEREIRA, G. M.; MONTEZANO, B. E. M.; DUTRA, R. M. **Aerogeradores de pequeno porte: Percapção dos potenciais consumidores**. Cepel. Rio de Janeiro, p. 9. 2015.

PEREIRA, M. G.; DA SILVA, N. F.; FREITAS, M. A. V. Energia eólica de pequeno porte nos EUA: Elementos para o debate. **VI Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Belo Horizonte, 4 a 7 Abril 2016. 8.

PILACAS. **Relatório técnico final**. UFPE. Recife, p. 30. 2014.

POWERLAB DK. PowerLab DK. **SYSLAB**, 2014. Disponível em: <<http://www.powerlab.dk/facilities/syslab.aspx>>. Acesso em: 28 Abril 2016.

PRICE, T. J. James Blyth – Britain’s first modern wind power pioneer. **Wind Engineering**, Pontypridd, v. 29, p. 191–200, 2005.

QGIS. QGIS. **Site da Open Source Geospatial Foundation (OSGeo)**, 2017. Disponível em: <<http://qgisbrasil.org/>>. Acesso em: 27 Janeiro 2017.

REAL, F. **Contato pessoal**. INMETRO. Rio de Janeiro. 2015. Mensagem recebida por oyamadouglass@gmail.com.

REN21. **Renewables 2015 Global Status Report**. Renewable Energy Policy Network for th 21st Century. Paris, p. 251. 2015.

REZENDE NETO, N. M.; ARAÚJO, A. M. **Desenvolvimnto de uma ferramenta computacional para análise de dados de vento de acordo com a norma IEC 61400-1:2005**. UFPE. Recife, p. 4. 2012.

RISO DTU. **Research Infrastructure SYSLAB**. Riso DTU. [S.l.], p. 5. 2011.

ROCHA, G. J. A. M. **Análise vibracional em uma torre eólica para um aerogerador de pequeno porte**. UFPE. Recife, p. 43. 2015.

ROHATGI, J. S.; ARAÚJO, A. M.; MENDES PRIMO, A. R. Extreme Wind Speeds and Their Prediction for Wind Turbines. **Wind Engineering**, v. 37, n. 6, p. 595-603, Setembro 2013.

ROLLAND, S.; AUZANE, B. **The potential of small and medium wind energy in developing coutries**. Alliance for Rural Electrification (ARE). Brussels, p. 12. 2012.

SCOTTISHPOWER RENEWABLES. Scottishpower Renewables. **Whitelee Windfarm**, 2016. Disponível em: <<http://www.whiteleewindfarm.com>>. Acesso em: 28 Abril 2016.

SILVA, A. C. et al. Análise das atuais políticas de incentivo à mini e microgeração distribuída e da certificação de aerogeradores de pequeno porte no Brasil. **CONEM 2016**, Fortaleza, 21-25 Agosto 2016. 10.

SILVA, G. **Características de vento da região Nordeste**: Análise, modelagem e aplicações para projetos de centrais eólicas. Recife: UFPE, 2003. 131 p. Dissertação de Mestrado defendida no PPGEM-UFPE.

SMALL WIND CERTIFICATION COUNCIL. Sobre certificação de aerogeradores de pequeno porte. **Site da Small Wind Certification Council**, 2016. Disponível em: <<http://smallwindcertification.org>>. Acesso em: 15 Abril 2016.

SPERA, D. A. **Wind Turbine Technology**: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering. 2^a. ed. New York: ASME press., 2009.

TD ENGINEERING. Certification of Wind Turbines. **TD Engineering**, 2016. Disponível em: <<http://www.td-engineering.dk>>. Acesso em: 29 Abril 2016.

TEXAS TECH UNIVERSITY. **Scaled Wind Farm Technology Facility (SWiFT) Commissioning**, 2016. Disponível em: <<http://www.depts.ttu.edu/communications/media/press-kits/swift.php>>. Acesso em: 31 Maio 2016.

TIBA, C. **Atlas Solarimétrico do Brasil**. UFPE. Recife, p. 116. 2000.

TÜV RHEINLAND. Wind Turbine Certification. **TÜVRheinland**, 2016. Disponível em: <http://www.tuv.com/en/corporate/business_customers/plants_machinery_1/renewable_energy_sources_1/wind_turbine_certification_cw/wind_turbine_certification.html>. Acesso em: 28 Abril 2016.

TÜVNEL. Technischer Überwachungsverein. **TÜVNEL**, 2016. Disponível em: <http://www.tuvnel.com/site2/subpage/product_verification_wind_turbines>. Acesso em: 11 Abril 2016.

UNDEWRITERS LABORATORY. UL Wind Turbine Certification Brochure. **Undewriters Laboratory**, 2015. Disponível em: <http://industries.ul.com/wp-content/uploads/sites/2/2015/10/UL-Certification-Broschure_2015_US_final.pdf>. Acesso em: 03 Maio 2016.

UNDEWRITERS LABORATORY. Services for large and small wind turbines and supply chain components. **Undewriters Laboratory**, 2016. Disponível em: <<http://industries.ul.com/energy/wind>>. Acesso em: 29 Abril 2016.

WIKIPEDIA. Sobre Charles F. Brush. **Site da Wikipedia**, 2016. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_F._Brush>. Acesso em: 24 Março 2016.

WINCHARGER. Sobre Aerogeradores de pequeno porte. **Site da Wincharger**, 2015. Disponível em: <<http://www.wincharger.com/#>>. Acesso em: 24 Março 2016.

WIND ENERGY INSTITUTE OF CANADA. Sobre ensaios de aerogeradores. **WEICAN**, 2016. Disponível em: <<http://www.weican.ca/>>. Acesso em: 08 Abril 2016.

WIND ENERGY THE FACTS. CHAPTER 6: SMALL WIND TURBINES. **Wind Energy The Facts**, 2009. Disponível em: <<https://www.wind-energy-the-facts.org/index-26.html>>. Acesso em: 25 Julho 2017.

WIND POWER MONTHLY. Sobre o porte das turbinas eólicas. **Site da Wind Power Monthly**, 2014. Disponível em: <<http://www.windpowermonthly.com/10-biggest-turbines>>. Acesso em: 31 Março 2016.

WINDSECTOR. Sobre aerogerador para geração de eletricidade. **Site Windsector**, 2011. Disponível em: <<http://windsector.tumblr.com/post/4711554356/the-first-wind-turbine-in-america>>. Acesso em: 11 Abril 2016.

WOOD, D. **Small Wind Turbines: Analysis, Design and Application**. 1ª. ed. London: Springer, 2011.

WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION. **Small Wind World Report**. World Wind Energy Association. Bonn, p. 16. 2016.

YU, Z. **Introduction on Certification and Testing of Wind Turbine in China**. China General Certification Center. [S.l.], p. 20. 2013.

APÊNDICE A – Normas internacionais e tipos de certificação

Neste Apêndice serão apresentadas e brevemente discutidas as principais normas internacionais utilizadas para ensaios de aerogeradores de pequeno porte (APPs), com o intuito da certificação, e como essas normas podem ser adaptadas às condições locais desejadas ou, no nosso caso, como adaptá-las para as condições climatológicas e de distribuição de vento do NE brasileiro. As normas principais são as da família IEC 61400, mais especificamente as -2 e -12-1. As normas AWEA e BWEA já são adaptações daquelas sendo utilizadas nos EUA e Inglaterra respectivamente. Além desses, outros países já adaptaram suas normas como é o caso da Alemanha e Japão, por exemplo. Lembrando que o exposto neste capítulo são informações disponíveis ao público de ensaios realizados pelo NREL, por exemplo.

IEC 61400

Como relatado por Manwell *et al.* (2009, p. 322), uma variedade de normas para projeto, ensaio e operação de aerogeradores foi preparada ou está sendo desenvolvida. A família de normas para aerogeradores pode ser verificada e adquirida no *website* da IEC, conforme mostrado na Tabela A1 (IEC, 2016).

Tabela A1. Normas IEC aplicáveis à aerogeradores.

Norma	Descrição
IEC 61400-1:2005	Wind turbines - Part 1: Design requirements
IEC 61400-2:2013	Wind turbines - Part 2: Small wind turbines
IEC 61400-3:2009	Wind turbines - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines
IEC 61400-4:2012	Wind turbines - Part 4: Design requirements for wind turbine gearboxes
IEC 61400-11:2012	Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques
IEC 61400-12-1:2005	Wind turbines - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines
IEC 61400-12-2:2013	Wind turbines - Part 12-2: Power performance of electricity-producing wind turbines based on nacelle anemometry
IEC 61400-13:2015	Wind turbines - Part 13: Measurement of mechanical loads
IEC TS 61400-14:2005	Wind turbines - Part 14: Declaration of apparent sound power level and tonality values
IEC 61400-21:2008	Wind turbines - Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines
IEC 61400-22:2010	Wind turbines - Part 22: Conformity testing and certification
IEC 61400-23:2014	Wind turbines - Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades
IEC 61400-24:2010	Wind turbines - Part 24: Lightning protection
IEC 61400-25-1:2006	Wind turbines - Part 25-1: Communications for monitoring and control of wind power plants - Overall description of principles and models
IEC 61400-25-2:2015	Wind turbines - Part 25-2: Communications for monitoring and control of wind power plants - Information models
IEC 61400-25-3:2015 RLV	Wind turbines - Part 25-3: Communications for monitoring and control of wind power plants - Information exchange models
IEC 61400-25-4:2008	Wind turbines - Part 25-4: Communications for monitoring and control of wind power plants - Mapping to communication profile
IEC 61400-25-5:2006	Wind turbines - Part 25-5: Communications for monitoring and control of wind power plants - Conformance testing
IEC 61400-25-6:2010	Wind turbines - Part 25-6: Communications for monitoring and control of wind power plants - Logical node classes and data classes for condition monitoring
IEC TS 61400-26-1:2011	Wind turbines - Part 26-1: Time-based availability for wind turbine generating systems
IEC TS 61400-26-2:2014	Wind turbines - Part 26-2: Production-based availability for wind turbines
IEC 61400-27-1:2015	Wind turbines - Part 27-1: Electrical simulation models - Wind turbines

Fonte: Compilado de (IEC, 2016).

Essas normas são para aerogeradores de modo geral, porém quando se trata de APPs a norma torna-se explícita. Porém, antes de se mostrar os ensaios que tratam de APPs especificamente, serão apresentados os tipos de certificação existentes e os respectivos ensaios necessários.

Tipos de certificação

A certificação e os ensaios de aerogeradores são muito importantes para fornecer garantia da máquina a todas as entidades envolvidas em projetos eólicos: operadores de parques eólicos, bancos, agências governamentais, etc. A certificação oferece uma documentação de um resultado, procedimento ou serviço que está em conformidade com uma determinada norma reconhecida (IEC, 2010).

Os procedimentos previstos na norma IEC 61400-22 constituem uma avaliação completa da conformidade de um aerogerador, de um componente ou de um ou mais aerogeradores em um local específico, abordando desde a avaliação de projeto até o monitoramento do comissionamento e da operação. Esta avaliação conduz a um dos seguintes certificados (IEC, 2010):

- **Certificado de Tipo:** Um certificado de tipo abrange um aerogerador, incluindo a torre e a conexão entre a torre e a fundação. Tal certificado exige a realização de ensaios padronizados pela IEC;
- **Certificado de Projeto:** Um certificado de projeto abrange um ou mais aerogeradores, incluindo a(s) fundação(ões). Um certificado de projeto inclui a avaliação das condições do local e a avaliação do projeto da(s) fundação(ões) como módulos obrigatórios;
- **Certificado de Componente:** Um certificado de componente abrange um componente relevante, tal como a pá ou a caixa de engrenagens;
- **Certificado de Protótipo:** Um certificado de protótipo abrange aerogeradores que ainda não se encontram prontos para fabricação em série.

Certificação de tipo

O objetivo da Certificação de Tipo é confirmar se o aerogerador foi projetado, documentado e fabricado em conformidade com especificações de projeto, normas específicas e outros requisitos técnicos.

É necessária uma demonstração de que seja possível instalar, operar e manter os aerogeradores de acordo com a documentação do projeto. A Certificação de Tipo aplica-se a uma série de aerogeradores de projeto e fabricação usuais. Ela verifica os procedimentos relacionados com o projeto, fabricação, testes de conformidade e também aos planos de transporte, montagem, instalação e manutenção das máquinas.

A Certificação de Tipo aplica-se a aerogeradores que estão em processo de fabricação em série e é composta pelos seguintes módulos obrigatórios (Figura A1):

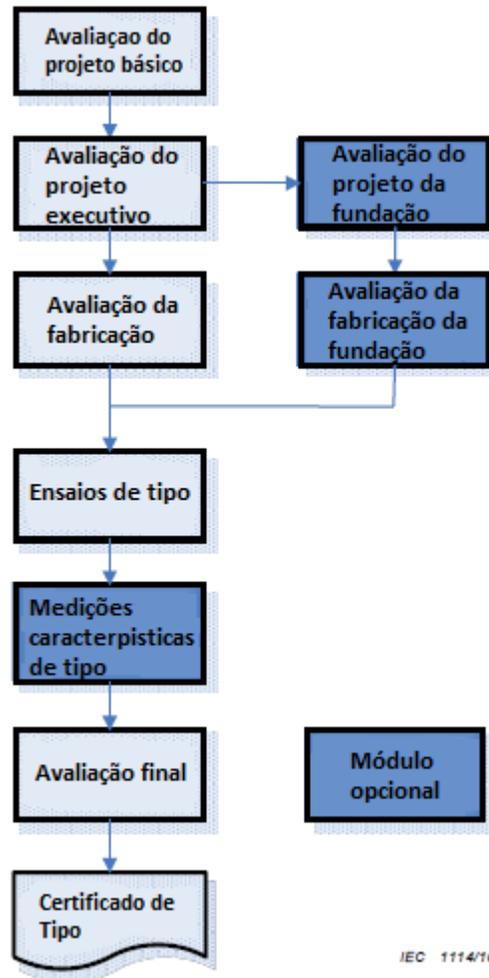
- Avaliação da base do projeto;
- Avaliação do projeto;
- Ensaio de tipo;
- Avaliação da fabricação;
- Avaliação final.

E pelos módulos opcionais:

- Avaliação do projeto de fundação;
- Avaliação da fabricação da fundação;
- Medições características de tipo.

Confirmando se o aerogerador está projetado em conformidade com as especificações de projeto, padrões específicos e outros requisitos técnicos, a certificação de tipo deve confirmar também se o processo de fabricação, especificações dos componentes, procedimentos de teste e inspeção e documentação correspondente estão em conformidade com a documentação de projeto e se o fabricante opera em um sistema de qualidade aceito (IEC, 2010).

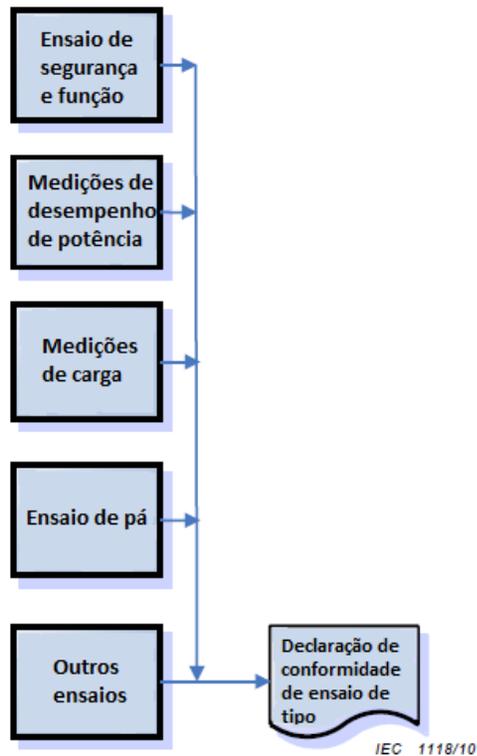
Figura A1. Módulos da certificação de tipo.



Fonte: Adaptado de (IEC, 2010).

A finalidade dos ensaios de tipo é fornecer dados de aerogeradores necessários para verificar o desempenho de potência, e outros aspectos vitais para a segurança e que necessitam de verificação experimental adicional e quaisquer outros que não possam ser averiguados de forma confiável pelas avaliações. Os ensaios de tipo compreendem os elementos mostrados na Figura A2. Para aerogeradores de pequeno porte, de acordo com IEC 61400-2, os ensaios “Medições de carga” e “Ensaio de pá” devem ser substituídos pelo “Ensaio de duração” (IEC, 2010).

Figura A2. Ensaio de tipo.



Fonte: (IEC, 2010).

Segue o detalhamento de cada ensaio:

➤ **Segurança e função**

A finalidade dos ensaios de segurança e função é verificar se o aerogerador exibe o comportamento previsto no projeto. O organismo de certificação deve verificar que as funções dos sistemas de controle e proteção sejam satisfatórias. Além disso, o comportamento dinâmico do aerogerador na velocidade do vento nominal ou superior a ela deve ser verificado se isso não tiver sido verificado no âmbito das medidas de carga. Os requerimentos de ensaio são detalhados no anexo D da IEC 61400-22.

➤ **Medições de desempenho de potência**

A finalidade das medições de desempenho de potência é documentar uma curva de potência medida e a produção anual de energia prevista para o aerogerador, de acordo com a IEC 61400-12-1.

O organismo de certificação deve verificar se os procedimentos de medição estão em conformidade com a IEC 61400-12-1 e se as condições de medição, instrumentação, calibrações, e análises são descritas no relatório, também de acordo com a norma IEC 61400-12-1.

Os requerimentos de ensaio para APPs estão no anexo H da mesma norma.

➤ **Medições de carga**

A finalidade de medições de carga é validar os cálculos de projeto e determinar a magnitude das cargas sob condições específicas.

O organismo de certificação deve avaliar medidas de carga realizadas para certificação de tipo e revisar a análise dos dados medidos, fornecidos pelo requerente.

As medições devem ser realizadas em um aerogerador que é dinâmico e estruturalmente semelhante, mas podem diferir em detalhes do aerogerador submetido à certificação (como projetos alternativos de torre). Em caso de diferenças, o requerente deve avaliá-las. Por exemplo, realizar previsões de carga e a de comportamento dinâmico para o aerogerador.

Orientações para procedimentos e avaliação do teste podem ser encontradas em IEC/TS 61400-13.

➤ **Ensaio de pá**

A finalidade desses ensaios é verificar o projeto estrutural da pá e avaliar a adequação dos processos de fabricação. Ensaio estruturais em grande escala são necessários para cada novo tipo de pá. Um tipo de pá é descrito, não só em termos do seu tamanho e forma, mas também em termos da sua construção interna e estrutura. Ensaio de fadiga, bem como estáticos, são

necessários. Orientação para procedimentos de teste e avaliação dos testes podem ser encontrados nas especificações para teste estrutural de pás dentro das séries IEC 61400.

Mudanças no projeto devem ser sujeitas a aprovação pelo organismo de certificação. Se o projeto da pá é alterado, o organismo de certificação deve determinar a necessidade e as exigências para quaisquer novos ensaios através de consulta com o fabricante. Novos ensaios serão necessários de imediato no caso de qualquer mudança significativa no projeto, como:

- Sistema estrutural;
- Perfil aerodinâmico;
- Material nas de carregamento crítico; e
- Zonas de transição na raiz da pá.

➤ **Outros ensaios**

O organismo de certificação pode exigir outros ensaios e/ou medições. Outros ensaios também podem ser solicitados pelo requerente para inclusão nos ensaios de tipo. Tais ensaios podem incluir:

- Condições térmicas dos principais componentes mecânicos e elétricos;
- Condições mecânicas (vibrações, folgas, resposta) dos principais componentes mecânicos e elétricos;
- Ensaios ambientais dos conjuntos eletrônicos; e
- Testes de compatibilidade eletromagnética.

➤ **Declaração de conformidade para os ensaios de tipo**

O organismo de certificação deve emitir uma declaração de conformidade com base na avaliação satisfatória dos relatórios de teste. A declaração de conformidade deve especificar:

- Os ensaios realizados;

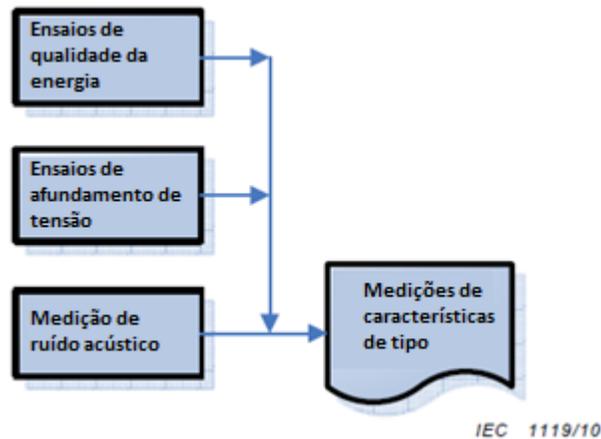
- Os padrões aplicados; e
- Identificação dos relatórios de ensaio.

Medições características de tipo

A finalidade das medições características de tipo é estabelecer características relacionadas com o desempenho do aerogerador, que não seja medição do desempenho de potência (que é um elemento obrigatório dos ensaios de tipo). Estas medições opcionais podem ser selecionadas pelo requerente e devem estar em conformidade com as normas IEC 61400 pertinentes. As medições características de tipo compreendem um ou mais dos seguintes elementos (Figura A3):

- Ensaios de Qualidade de Energia;
- Ensaios de afundamento de tensão (LVRT);
- Medições de ruído acústico.

Figura A3. Fluxograma das medições características de tipo.



Fonte: Adaptado de (IEC, 2010)

➤ Ensaios de Qualidade de Energia

Para a Certificação de Tipo em que as medições de qualidade de energia estão incluídas, o organismo de certificação deve verificar se os procedimentos das medições estão em conformidade com a norma IEC 61400-21 e se as condições de medição, instrumentação, calibrações e análises são descritas no relatório de teste, também de acordo com a norma IEC

61400-21. O objetivo destas medidas é documentar a qualidade característica da energia gerada pelo aerogerador.

➤ **Ensaaios de afundamento de tensão**

Para a Certificação de Tipo no qual os ensaios em baixa tensão estão incluídos, o organismo de certificação deve verificar se os procedimentos de medição estão em conformidade com as normas pertinentes e se as condições de medição, instrumentação e equipamentos, calibrações e análises são descritas no relatório, também de acordo com as normas pertinentes. As normas devem incluir:

- IEC 61400-21; e
- Outras normas acordadas entre o organismo de certificação e o requerente.

O objetivo destas medidas é documentar o desempenho do aerogerador em baixa tensão.

➤ **Medições de ruído acústico**

Para a Certificação de Tipo em que as medições de ruído acústico estão incluídas, o organismo de certificação deve verificar se as medições estão em conformidade com a norma IEC 61400-11. O objetivo destas medições é documentar as características de emissão acústica do aerogerador. No caso, o organismo de certificação deve verificar se as medições pelo menos incluem o:

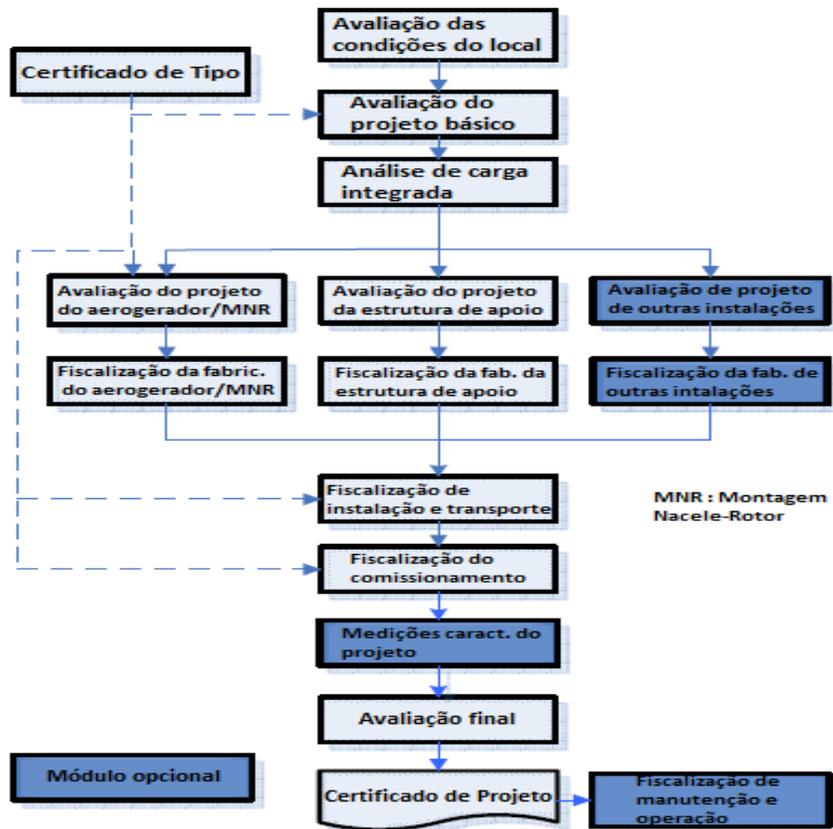
- Nível de potência sonora aparente em uma faixa de velocidade do vento;
- Índice de som diretividade nas três posições necessárias; e
- Tonalidade de quaisquer tons acima do limiar mínimo tal como definido na IEC 61400-11.

O organismo de certificação deve também verificar se as condições de medição, instrumentação, calibrações e análises são descritas no relatório de teste em conformidade com a norma IEC 61400-11.

Certificação de projeto

O objetivo da Certificação de Projeto é avaliar se os aerogeradores com Certificado de tipo e os projetos da(s) fundação(ões)/estrutura de apoio estão em conformidade com as condições externas, com os códigos elétricos e de construção aplicáveis e com outros requisitos pertinentes a um lugar específico. Se não houver um Certificado de Tipo emitido para o aerogerador, o módulo obrigatório Certificado de Tipo dentro da Certificação de Projeto (Figura A4) deve ser cumprido, e, conseqüentemente, os módulos obrigatórios da Certificação de tipo abrangidos pela Certificação de projeto devem ser avaliados no que diz respeito ao projeto específico e às condições específicas do local. O organismo de certificação deve avaliar se as condições de vento, ambientais, de rede elétrica e do solo no local estão conforme as condições definidas na documentação de projeto do aerogerador e da(s) fundação(ões). As avaliações são relativas à segurança e qualidade.

Figura A4. Módulos da Certificação de Projeto.



Fonte: Adaptado de (IEC, 2010).

O Certificado de Projeto documenta a conformidade para todos os módulos obrigatórios e podem adicionalmente documentar a conformidade para módulos opcionais. O certificado é emitido com base na integralidade e transparência dos relatórios de avaliação e declarações de conformidade.

Certificação de componente

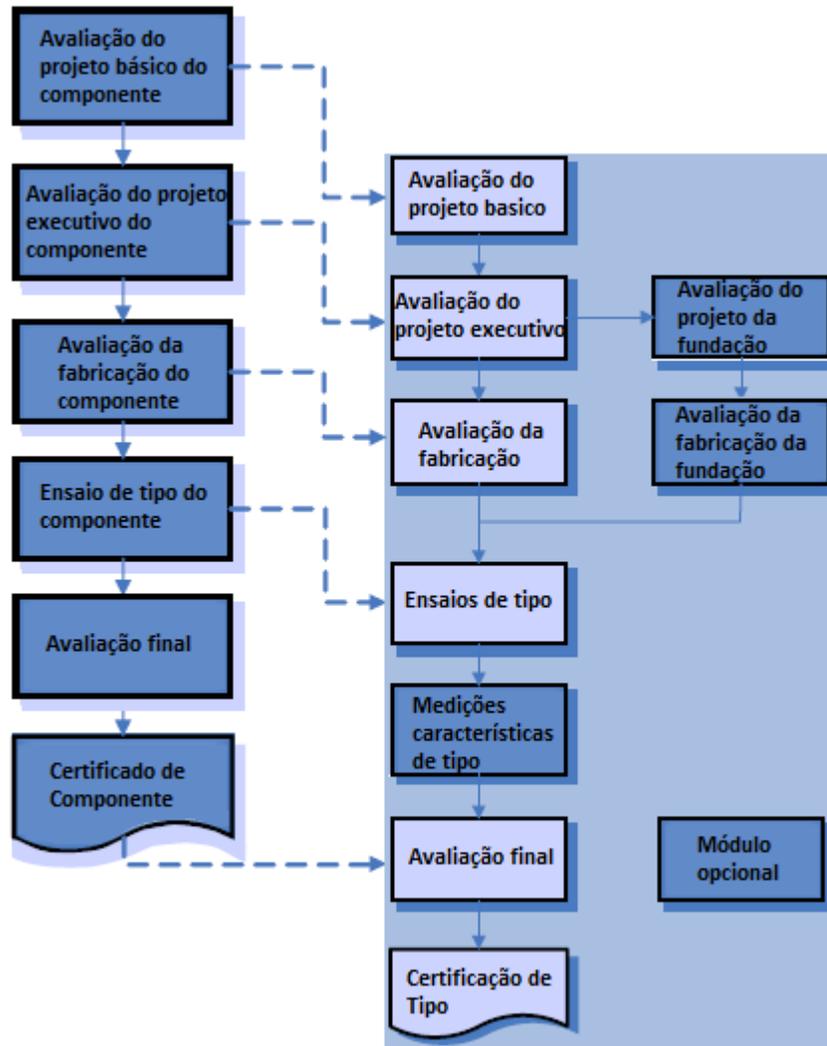
A Certificação de Componente confirma se um dos principais componentes de um aerogerador, como a pá ou a caixa de engrenagens, foi desenvolvido, documentado e fabricado em conformidade com os pressupostos de projeto, padrões específicos e outros requisitos técnicos. Os procedimentos para a Certificação de Componente estão em conexão com os procedimentos de Certificação de Tipo. O conteúdo específico de um módulo depende do componente.

A Certificação de Componente do aerogerador é composto pelos seguintes módulos:

- Avaliação da base do projeto;
- Avaliação do projeto;
- Ensaio de tipo;
- Avaliação da fabricação;
- Avaliação final.

Estes módulos bem como suas aplicações para o processo de Certificação de Tipo são ilustrados na Figura A5. Os procedimentos para a Certificação de Componente devem estar de acordo com os procedimentos da Certificação de Tipo descritos na Cláusula 8 da IEC 61400-22. O conteúdo específico de um módulo depende do componente a ser certificado.

Figura A5. Módulos da Certificação de Componente e suas aplicações na Certificação de Tipo.



Fonte: Adaptado de (IEC, 2010).

Uma atenção especial deve ser dada na documentação de projeto para a especificação da interface entre os componentes e o resto do aerogerador e para a especificação de condições críticas, como as condições de operação, cargas e propriedades dinâmicas.

Os Certificados de Componente podem ser emitidos para componentes projetados e avaliados em termos de conformidade com os requisitos técnicos das normas IEC 61400-1, IEC 61400-2 ou IEC 61400-3 baseados na integralidade e transparência dos relatórios de Avaliação final. Um Certificado de Componente atesta que a conformidade foi estabelecida para todos os módulos

de avaliação. Uma avaliação satisfatória de cada módulo é concluída com um relatório de avaliação e uma declaração de conformidade.

Certificação de protótipo

O objetivo da Certificação de Protótipo é para permitir o ensaio de um novo aerogerador a fim de obter o Certificado de Tipo de acordo com IEC 61400-22. Como já elucidado, um Certificado de Protótipo é emitido para um aerogerador que ainda não está pronto para fabricação em série, num determinado local e por um período máximo limitado de 3 anos. O organismo de certificação deve avaliar se o protótipo é seguro durante o período especificado. Se um protótipo é modificado afetando a segurança do aerogerador, um novo certificado de protótipo é requerido.

A Certificação de Protótipo é constituído pelos seguintes módulos:

- Avaliação do projeto básico;
- Avaliação do plano de ensaio do protótipo; e
- Ensaio de segurança e função.

A avaliação do projeto básico inclui os módulos obrigatórios de avaliação básica do projeto e de avaliação do projeto do aerogerador, descrito nos tópicos 8.2 e 8.3 da IEC 61400-22. A avaliação pode ser limitada ao controle e ao sistema de proteção, casos de carga, pás do rotor, principais componentes estruturais e elétricos e às questões de segurança pessoal.

Um plano de ensaio para o protótipo será submetido à avaliação. O plano de ensaio deve especificar os principais componentes a serem ensaiados e os carregamentos a serem documentados durante os ensaios.

IEC 61400-2

Essa norma trata especificamente de aerogeradores de pequeno porte, intitulada *Wind turbines – Part 2: Small wind turbines*, incluindo os ensaios para verificação de dados de projeto, cargas mecânicas, duração, ensaio mecânico de componente, segurança e função, avaliação ambiental

e ensaios elétricos, além de informações e tratativas gerais (IEC, 2013). Dos ensaios mencionados foram descritos os principais no APÊNDICE C.

Chama a atenção o ensaio de duração que para um aerogerador ser aprovado em tal ensaio, ele deve alcançar ao menos 10 minutos a uma velocidade do vento de 2,2 da velocidade média e essa velocidade não pode ser menor que 15 m/s. Daí, deve-se verificar se esse critério é atendido para uma área que seja possível a realização de todos os ensaios. Esse critério não deve tornar a área selecionada proibitiva, portanto deve-se analisar a possibilidade de adaptação desse critério para as condições do local.

IEC 61400-12-1

A IEC 61400-12-1 (no Brasil ABNT NBR IEC 61400-12-1) trata dos ensaios de desempenho de potência de aerogeradores e em seu anexo H, aerogeradores de pequeno porte especificamente.

O objetivo desta parte da IEC 61400 é proporcionar uma metodologia uniforme que assegura a consistência, precisão e reprodutibilidade na mensuração e análise de desempenho de energia em aerogeradores. A faixa de velocidades do vento deve ser dividida em intervalos de 0,5 m/s e centradas em múltiplos desse valor (ABNT, 2012). O ensaio de desempenho de potência é o mais difícil de ser realizado, pois, deve cobrir toda a faixa de velocidades de operação do APP, ficando difícil alcançar velocidades muito altas com um fator de forma alto (APÊNDICE C).

O problema desta Norma aplicada ao Brasil, diga-se a região Nordeste, é que seus cálculos de produção de energia estimada são baseados na distribuição de Rayleigh, caso particular da distribuição de Weibull quando $k=2$. Não obstante, o valor médio do fator de forma de Weibull para a região é $k=3,5$ (SILVA, 2003). Isso implica dizer que os ventos dessa região são mais uniformes, ou seja, não variam muito em relação ao valor médio. Além disso, tem-se pouca variabilidade também na direção, sendo o vento predominante de sudeste (SILVA, 2003).

A diferença da aplicação das distribuições de Rayleigh, Equação A1, e Weibull, Equação B1 do APÊNDICE B, é que a primeira depende apenas da velocidade média e a segunda de dois fatores: o de forma e o de escala, k e c respectivamente (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 59).

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{V}{V_m}\right)^2\right] \quad (A1)$$

A Tabela A2 mostra uma comparação entre Rayleigh e Weibull, evidenciando o erro absoluto associado à utilização da primeira em locais onde se varia o k . Estimou-se a probabilidade, Equação B3 (APÊNDICE B), para $k=2$ no primeiro caso e no segundo $k=4$, ambos para uma velocidade média anual hipotética de 6,0 m/s.

Tabela A2. Erro absoluto entre Rayleigh e Weibull.

V (m/s)	Rayleigh	Weibull	Erro	V (m/s)	Rayleigh	Weibull	Erro
0-0,5	0,55%	0,00%	0,55%	11,5-12	1,22%	0,01%	1,21%
0,5-1	1,64%	0,05%	1,60%	12-12,5	0,97%	0,00%	0,97%
1-1,5	2,68%	0,20%	2,48%	12,5-13	0,77%	0,00%	0,77%
1,5-2	3,62%	0,54%	3,09%	13-13,5	0,60%	0,00%	0,60%
2-2,5	4,46%	1,12%	3,34%	13,5-14	0,46%	0,00%	0,46%
2,5-3	5,15%	2,01%	3,15%	14-14,5	0,35%	0,00%	0,35%
3-3,5	5,70%	3,21%	2,49%	14,5-15	0,26%	0,00%	0,26%
3,5-4	6,09%	4,72%	1,36%	15-15,5	0,19%	0,00%	0,19%
4-4,5	6,31%	6,44%	-0,13%	15,5-16	0,14%	0,00%	0,14%
4,5-5	6,38%	8,21%	-1,83%	16-16,5	0,10%	0,00%	0,10%
5-5,5	6,32%	9,79%	-3,47%	16,5-17	0,07%	0,00%	0,07%
5,5-6	6,12%	10,90%	-4,78%	17-17,5	0,05%	0,00%	0,05%
6-6,5	5,83%	11,31%	-5,48%	17,5-18	0,04%	0,00%	0,04%
6,5-7	5,45%	10,86%	-5,42%	18-18,5	0,03%	0,00%	0,03%
7-7,5	5,01%	9,60%	-4,59%	18,5-19	0,02%	0,00%	0,02%
7,5-8	4,53%	7,75%	-3,21%	19-19,5	0,01%	0,00%	0,01%
8-8,5	4,04%	5,65%	-1,61%	19,5-20	0,01%	0,00%	0,01%
8,5-9	3,55%	3,69%	-0,14%	20-20,5	0,01%	0,00%	0,01%
9-9,5	3,07%	2,14%	0,94%	20,5-21	0,00%	0,00%	0,00%
9,5-10	2,63%	1,08%	1,54%	21-21,5	0,00%	0,00%	0,00%
10-10,5	2,21%	0,47%	1,74%	21,5-22	0,00%	0,00%	0,00%
10,5-11	1,84%	0,18%	1,66%	22-22,5	0,00%	0,00%	0,00%
11-11,5	1,51%	0,06%	1,45%	22,5-23	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: o autor.

A Tabela A2 evidencia a diferença dos valores das distribuições nos intervalos das velocidades. Note que os valores da distribuição de Weibull são, em geral, menores do que a de Rayleigh

devido à dispersão dos valores em relação à média. Ou ainda, os valores da distribuição de Rayleigh não correspondem à realidade do nordeste do Brasil. Observa-se que os valores em torno no valor médio são subestimados para Rayleigh.

A norma diz que para um ensaio completo de desempenho de potência o banco de dados deve obedecer aos seguintes critérios (ABNT, 2012):

- Cada *bin* de velocidade deve conter um mínimo de 30 minutos de dados (10 para APP);
- O banco de dados deve conter no mínimo 180 h de dados (60 para APP).

Porém, se houver um único *bin* incompleto impedindo a realização do ensaio, então cada valor pode ser estimado por interpolação linear de dois *bins* completos adjacentes. A fim de completar a curva de potência para velocidades altas, o procedimento a seguir pode ser utilizado (ABNT, 2012):

- Para velocidades de vento acima de 1,6 vezes a velocidade do vento a 85% da potência nominal, o setor de medições pode ser expandido.

Essa condição pode ser completada utilizando as seguintes medidas: a energia anual medida por procedimentos de expansão com desvios de menos de 1% da energia anual extrapolada até o maior completo *bin* de velocidade de vento utilizando esse mesmo procedimento (para a distribuição de Rayleigh) (ABNT, 2012).

Repara-se que a norma explicita a distribuição de Rayleigh. Porém, como apresentado em Silva (2003, p. 32), a distribuição para o Nordeste brasileiro é a de Weibull com valores de k mínimo de 2,5 e máximo de 4,5 (50 m).

Além disso, essa norma trata de (ABNT, 2012):

- Toda a preparação para o ensaio de potência (pequeno e grande portes);
- Testes de equipamentos;
- Procedimentos para as medições;

- Ajuste dos dados coletados;
- Avaliação dos obstáculos no local de ensaio assim como a do terreno;
- Procedimento para calibração do local, caso seja necessário;
- Avaliação de incertezas;
- Montagem dos instrumentos nas torres meteorológicas; e
- Anemometria.

Especificamente o seu anexo H trata de ensaios de potência de aerogeradores de pequeno porte. Nele há 18 itens que ajustam os critérios da norma para esse caso. Por exemplo, para aerogeradores de grande porte a norma sugere que as médias da velocidade do vento seja em intervalos de 10 min e o seu anexo H sugere que, para aerogeradores de pequeno porte, esse intervalo seja de apenas 1 min, dentre outras adaptações como a utilização de um banco de baterias (ABNT, 2012). Em relação ao intervalo de medição, pode ser verificado na Figura 53 confeccionada por da Silva (2015), utilizando os dados do Projeto PILACAS, que não há variação significativa na produção de energia se utilizado 1 ou 10 min. Vale salientar que a janela de dados foi pequena, cerca de 45 dias de medições a cada 1 Hz. Seria preciso averiguar os dados com mais tempo para se ter uma informação mais precisa sobre o intervalo mais adequado.

Vale lembrar que a norma não é absoluta. Ela é apenas um guia com procedimentos que ao ser realizado ou adaptado algum ensaio que não esteja nela têm que ser relatados e explicitados como foram realizados.

American Wind Energy Association (AWEA)

A norma da *American Wind Energy Association (AWEA)* intitulada “*AWEA Small Wind Turbine Performance and Safety Standard*” de 2009 é uma norma que segue os padrões da IEC 61400-2, -11 e -12-1, porém com algumas adaptações locais. A Tabela A3 mostra as principais diferenças entre a IEC 61400-12-1 (anexo H desta Norma) e AWEA para desempenho de potência, por exemplo.

Tabela A3. Principais diferenças entre IEC e AWEA.

IEC	AWEA
b) durante a caracterização de saída do sistema à rede, <u>o sistema do aerogerador deve incluir o aerogerador, a torre do aerogerador, o controlador, a fiação entre o aerogerador e a carga, o controlador de carga e descarga</u> (se for usado). Além disso, o sistema pode incluir um inversor de tensão.	No item b, <u>os bancos de baterias são considerados parte do sistema de aerogeradores</u> conectados à rede que incorporam um banco de baterias.
e) a fim de minimizar as diferenças nos resultados devido à fiação entre a aerogerador e a carga, <u>a conexão da carga deve estar entre a base da torre do aerogerador e no máximo até três vezes a altura da torre</u> . A instalação elétrica entre o aerogerador e a carga deve estar de acordo com as especificações do fabricante.	No item e, <u>o comprimento total do fio, medido a partir da base da torre, deve ter pelo menos 8 diâmetros de rotor</u> e a fiação deve ser dimensionada de acordo com as instruções de instalação do fabricante.
n) o banco de dados será considerado completo quando se atender aos seguintes critérios: 1) <u>cada bin de velocidade do vento entre 1 m/s abaixo do cut-in e 14 m/s deve conter um mínimo de 10 min de dados registrados;</u> 2) o banco de dados contém pelo menos 60 horas de dados com o aerogerador dentro da faixa de velocidade do vento; 3) no caso de os aerogeradores com sistema de embandeiramento automático, o banco de dados deve incluir todos os bins de velocidade do vento que caracterizam o desempenho quando a aerogerador estiver embandeirada.	No item n, <u>a base de dados deve incluir 10 minutos de dados para todas as velocidades do vento até pelo menos 5 m/s além da velocidade de vento mais baixa a 95% da potência nominal</u> (ou quando a potência nominal é atingida).

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2012) e (AWEA, 2009).

Resumo do Apêndice A

O **Apêndice A** mostrou os tipos de certificações existentes e os ensaios necessários para tal através das normas internacionais e também apresentou uma breve discussão sobre as principais normas. Essas normas, não são de fácil entendimento e por muitas vezes ambíguas podendo levar a várias interpretações e conseqüentemente a erros. As normas deveriam ser mais claras, objetivas, para ganho de tempo e fácil entendimento. Faz-se necessário observar que se deveria mostrar o porquê de se chegar aos valores/equações explícitos na norma. Ou seja, quando se solicitasse uma norma, deveria vir um documento que mostrasse o passo-a-passo de como se chegou a determinado resultado para que o leitor/utilizador dessa norma tivesse o direito de concordar ou não e assim até propor um meio mais coerente se for o caso. As normas quando

fossem traduzidas para o português brasileiro deveriam vir com as devidas modificações/adaptações para o cenário local.

Diante do exposto, fica clara a necessidade de se criar uma norma brasileira tendo como suporte a IEC 61400, não apenas tradução, mas sim com adaptações para a situação local.

APÊNDICE B – Breve análise dos parâmetros de Weibull

Há na literatura algumas distribuições de probabilidade que podem ser utilizadas para melhor representar o comportamento do vento e a sua escolha depende principalmente desse comportamento observado (SILVA, 2003). As principais distribuições são:

- Distribuição normal ou Gaussiana;
- Distribuição normal bivariável;
- Distribuição exponencial;
- Distribuição de Rayleigh;
- Distribuição de Weibull.

Na verdade, o que se queria buscar os pesquisadores era uma única distribuição que melhor representasse o comportamento do vento. Os primeiros resultados dessas pesquisas foram apresentados por Davenport (1963), Justus (1976) e Hennessy (1977) apud Silva (2003). Nesses estudos ficou constatado que Weibull era a distribuição que melhor representava o comportamento do vento, pois, ela incorpora tanto a distribuição exponencial ($k=1$) quanto a distribuição de Rayleigh ($k=2$) além de fornecer uma boa aproximação da distribuição normal quando o valor de k é próximo a 3,5 (SILVA, 2003).

Os principais parâmetros que propiciam a utilização da distribuição de Weibull para energia eólica são:

- Sua distribuição é centrada no valor médio e permite descrever um comportamento assimétrico em torno desse valor;
- Depende de dois parâmetros;
- Incorpora casos particulares (Rayleigh, por exemplo);
- Pode ser utilizado em análise de ventos extremos (ROHATGI, ARAÚJO e MENDES PRIMO, 2013).

A função distribuição cumulativa de Weibull (fdc) é a probabilidade de a velocidade do vento ser menor ou igual a uma dada velocidade V e é expressa por:

$$F(V) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (B1)$$

A função densidade de probabilidade (fdp) representa a fração de tempo que a velocidade do vento está centrada em um intervalo de 1 m/s em V (JOHNSON, 2001, p. 2-29) e é expressa por $f(V) = dF(V)/dV$ [s/m], resultando em:

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (B2)$$

Onde $k > 0$, $v > 0$ e $c > 1$ (JOHNSON, 2001, p. 2-31).

Porém, quando se integra a expressão $f(V) = dF(V)/dV$ em um intervalo definido de velocidade do vento, obtém-se a probabilidade de a velocidade de vento estar contida nesse intervalo, ou seja:

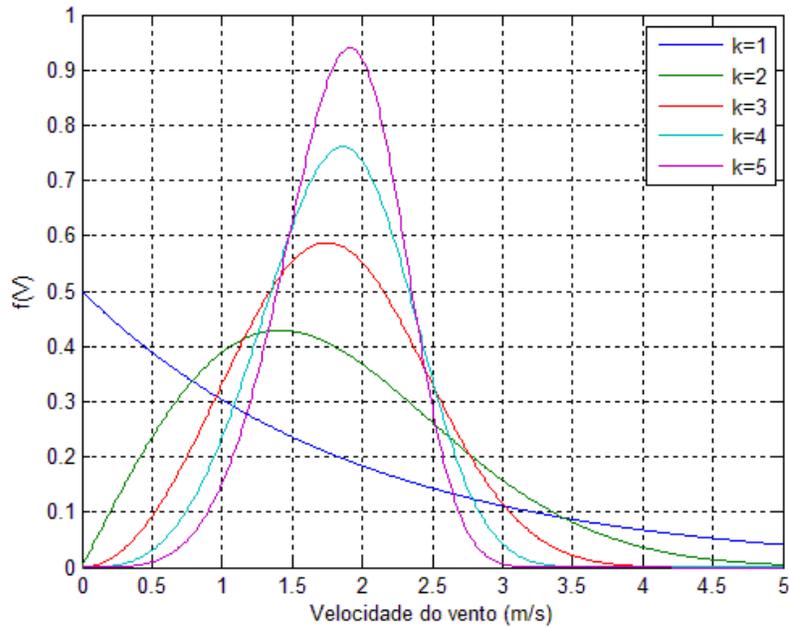
$$P(V_i < V < V_{i+1}) = \int_{V_i}^{V_{i+1}} f(V) dV = F(V_{i+1}) - F(V_i) \quad (B3)$$

onde $i = 1, 2, 3, \dots, n$ (JOHNSON, 2001, p. 2-35; MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 57; HANSEN, 2008, p. 57).

A fdp dá a fração de tempo em intervalos centrados de 1 m/s. Por exemplo, para se saber qual a frequência (ocorrência) de uma determinada velocidade do vento, estima-se $f(V)$ pela Equação B2 (JOHNSON, 2001, p. 2-36). Como neste trabalho será utilizado intervalos de 0,5 m/s devido às condições da IEC, será calculada a probabilidade por intervalos dada por $P(V_i < V < V_{i+1}) = F(V_{i+1}) - F(V_i)$.

Fazendo uma análise dos parâmetros de Weibull k e c através da fdp: fixando-se o valor de $c=2$, à medida que o valor de k aumenta os valores da velocidade do vento tendem a se concentrar em torno do seu valor médio, como mostrado na Figura B1.

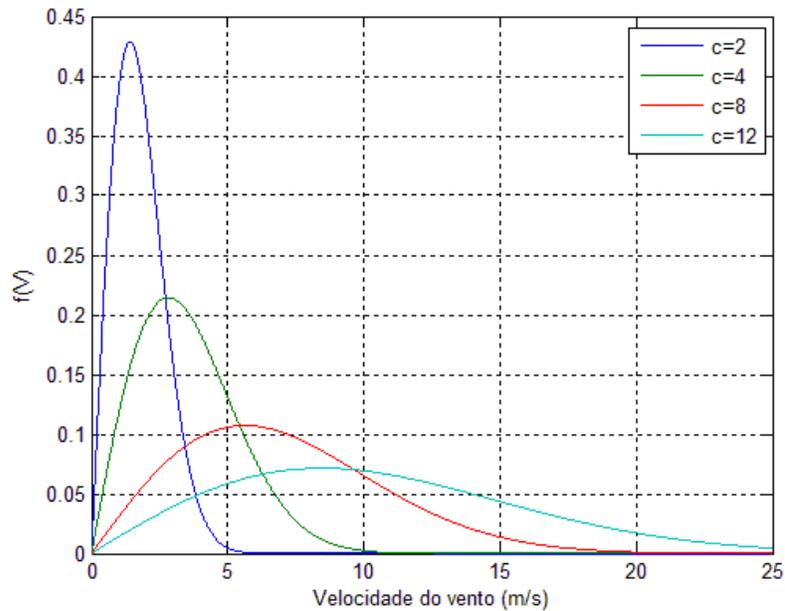
Figura B1. fdp para $c=2$ variando-se o k .



Fonte: o autor.

Como dito, para $k=1$ a distribuição de Weibull incorpora a função exponencial. Isso significa que $\Gamma(2)=(2-1)!=1$ (ANEXO B), ficando assim $c = V_m$ pela Equação B5. Outra situação em que $c = V_m$ é quando $k \rightarrow \infty$.

Quando se fixa o valor de $k=2$, à medida que o parâmetro de escala c aumenta os valores tendem a se dispersar em relação ao valor médio da velocidade do vento, como mostrado na Figura B2.

Figura B2. fdp para $k=2$ variando-se o c .

Fonte: o autor.

As curvas da fdp apresentadas nas Figuras B1 e B2 são ajustadas de acordo com os parâmetros k e c . Observa-se que quanto maior o k , maior a constância do vento e o oposto ocorre com o parâmetro c . No parâmetro k está intrínseca as características de vento do local, pois, nele se encontram as informações dos dados de vento, como proposto por Justus (1976) apud Manwell *et al.* (2009) para $1 \leq k < 10$:

$$k = \left(\frac{\sigma_V}{V_m} \right)^{-1,086} \quad (B4)$$

onde σ_V é o desvio padrão dos dados de velocidade do vento e V_m a velocidade média. Essa relação σ_V/V_m representa a intensidade de turbulência média do local.

O parâmetro c [m/s] é determinado pela Equação B5:

$$c = \frac{V_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (B5)$$

onde Γ é a função gama (ANEXO B).

Observa-se que o c depende de V_m e k . A partir de $k=2$, à medida que k aumenta c tende a diminuir como apresentado na Tabela B1, para os vários valores de V_m . Ou seja, com k aumentando e c por consequência diminuindo significa que os valores das velocidades tendem a se concentrar em torno do valor médio.

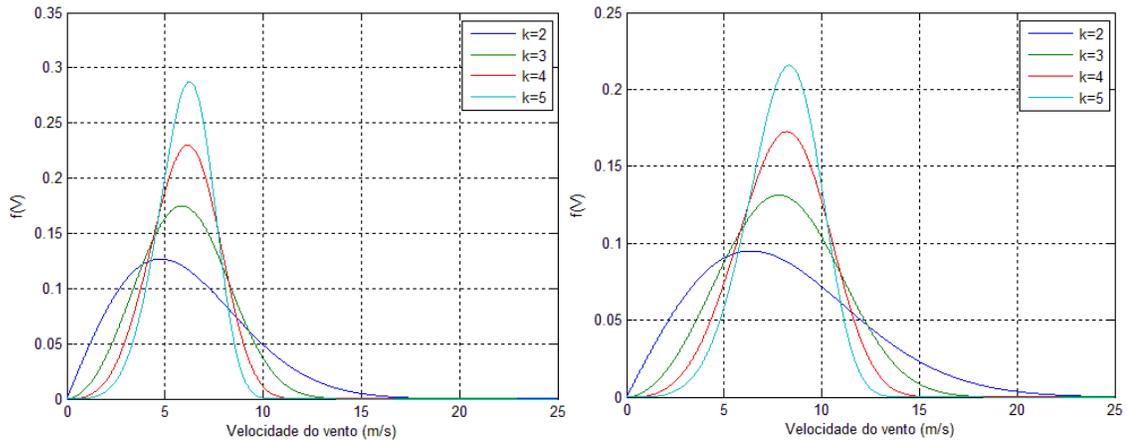
Tabela B1. Variação de k e c .

$V_m = 6 \text{ m/s}$		$V_m = 7 \text{ m/s}$		$V_m = 8 \text{ m/s}$	
k	$c \text{ [m/s]}$	k	$c \text{ [m/s]}$	k	$c \text{ [m/s]}$
2	6,77	2	7,90	2	9,03
3	6,72	3	7,84	3	8,96
4	6,62	4	7,72	4	8,83
5	6,53	5	7,62	5	8,71

Fonte: o autor.

É importante observar na Tabela B1 que quanto mais alta a velocidade média do local, mais alto o valor de c para um mesmo k , Figura B3. Ou seja, em um local com velocidade média anual de 6 m/s, por exemplo, os valores das velocidades locais tendem a ser mais constantes do que em um local com velocidade média 8 m/s. Para o leitor ter uma ideia, um k alto significa um valor maior ou igual a 3. O ideal seria um valor de $k \rightarrow \infty$ e um de $c \rightarrow 0$. Por exemplo, $k=10$ e $c=1$ para haver uma geração mais “firme” de energia eólica. Porém, na prática isso não acontece, pois, para se obter um c muito baixo significa que a velocidade média local teria que ser muito baixa também, tornando proibitivo a utilização da energia eólica para geração de eletricidade, pois, quando $k=1$ ou $k \rightarrow \infty$, $c \rightarrow V_m$ pela Eq. (6). Por outro lado, teoricamente, para uma área de ensaios deve-se ter uma faixa de velocidades mais ampla possível, sendo o ideal $k \rightarrow 0$ e $c \rightarrow \infty$.

Figura B3. $V_m=6$ m/s (esq.) e $V_m=8$ m/s.



Fonte: o autor.

Como se pode observar na Figura B3, quando $k \geq 3$ os valores da velocidade do vento não são muito dispersos em relação ao valor médio. Porém, quando a velocidade média aumenta de 6 para 8 m/s, observa-se um aumento nessa dispersão para um mesmo k , pois o parâmetro c também aumentou. Mesmo assim, nota-se que os valores são mais dispersos quando $k < 3$. O parâmetro c fornecerá o ajuste da curva fazendo com que a fdp aumente ou diminua dependendo do seu valor (Figura B3), podendo ficar assim a análise do regime de vento local simplesmente pelo k . Assim, como o parâmetro c depende de k e V_m para ser obtido e esse par dá um entendimento sobre o regime de vento local, serão os dados de entrada para a metodologia proposta.

APÊNDICE C – Detalhamento dos ensaios utilizados na Metodologia

Em relação aos ensaios de APPs, eles são realizados de acordo com as normas IEC. Segue abaixo a descrição dos principais ensaios, bem como o número de horas necessárias de cada velocidade para sua realização:

➤ **Desempenho de Potência (ABNT NBR IEC 61400-12-1)**

- O objetivo desse ensaio é documentar uma curva de potência medida e estimar a produção anual de energia para um determinado aerogerador, seguindo a IEC 61400-12-1 (anexo H para pequeno porte). Configura a curva de potência da máquina em um gráfico Potência (kW) vs. Velocidade do vento (m/s).
- Segundo o anexo H da ABNT NBR IEC 61400-12-1, item n, página 75:
 - 1) cada *bin* de velocidade entre 1 m/s abaixo da velocidade de *cut-in* e 14 m/s deve conter um mínimo de 10 min de dados;
 - 2) o banco de dados total deve conter pelo menos 60 horas de dados com o APP dentro da faixa de velocidades de operação da máquina.

➤ **Emissão de Ruído Acústico (IEC 61400-11)**

- Determina as características de emissão de ruído.
- Segundo o anexo F, item F.4, página 55 da BWEA IEC 61400-11: a faixa de velocidades requerida é do *cut-in* até no mínimo 11 m/s. Os dados devem cobrir até a velocidade de cut-out se possível, particularmente para aerogeradores que têm controle de velocidade.

➤ **Duração (IEC 61400-2)**

- Investiga a integridade estrutural e a degradação dos componentes (corrosão, rachaduras, deformações), a qualidade de proteção ambiental e o comportamento dinâmico.
- Segundo a IEC 61400-2, o aerogerador será aprovado no ensaio de duração quando estiver alcançado uma operação confiável, seguindo os seguintes critérios:
 1. Mínimo 6 meses de operação;

2. 2500 horas de produção de potência em ventos a qualquer velocidade;
3. 250 horas de produção de potência em ventos a $1,2V_m$ e acima;
4. 25 horas de produção de potência em ventos a $1,8V_m$ e acima.
5. 10 min em velocidades de vento a $2,2V_m$ e acima, porém não menos que 15,0 m/s durante a operação normal do aerogerador;

OBS.: Uma operação confiável significa: i) o aerogerador operando a pelo menos 90% do tempo; ii) sem falhas significativas no aerogerador ou componentes; iii) sem degradação significativa em relação ao meio ambiente; iv) sem perdas significativas da produção de potência em relação às velocidades do vento.

➤ **Segurança e Função (IEC 61400-2)**

- Verifica o comportamento previsto de projeto e se as disposições relativas à segurança pessoal estão adequadamente implementadas. O ensaio deve incluir funções críticas de controle e proteção descritos nos documentos de projeto, que incluem:
 - ✓ Controle de velocidade e potência;
 - ✓ Controle de *yaw*;
 - ✓ Perda de carga;
 - ✓ Proteção de sobre velocidade para a velocidade de projeto ou acima; e
 - ✓ Início e desligamento para velocidades do vento acima da de projeto.

➤ **Avaliação da Qualidade de Energia (ABNT NBR IEC 61400-21)**

- Mede as características de qualidade de energia de aerogeradores conectados à rede.
- Segundo a ABNT NBR IEC 61400-21 item 7.1: o ensaio deve varrer toda a faixa de velocidades de operação da máquina, exceto as acima de 15 m/s.

Lembrando que os ensaios de **Desempenho de Potência**, **Duração** e **Segurança e Função** são compulsórios, enquanto que os demais também são importantes, porém voluntários.

ANEXO A – Teoria da conversão eólica

A energia eólica nada mais é do que a conversão da energia cinética do vento em energia mecânica e conseqüentemente energia elétrica. A massa de ar escoando com uma velocidade V através de uma área A , Figura A1, representa a vazão mássica, dm/dt (kg/s), dada pela Equação A1 (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009):

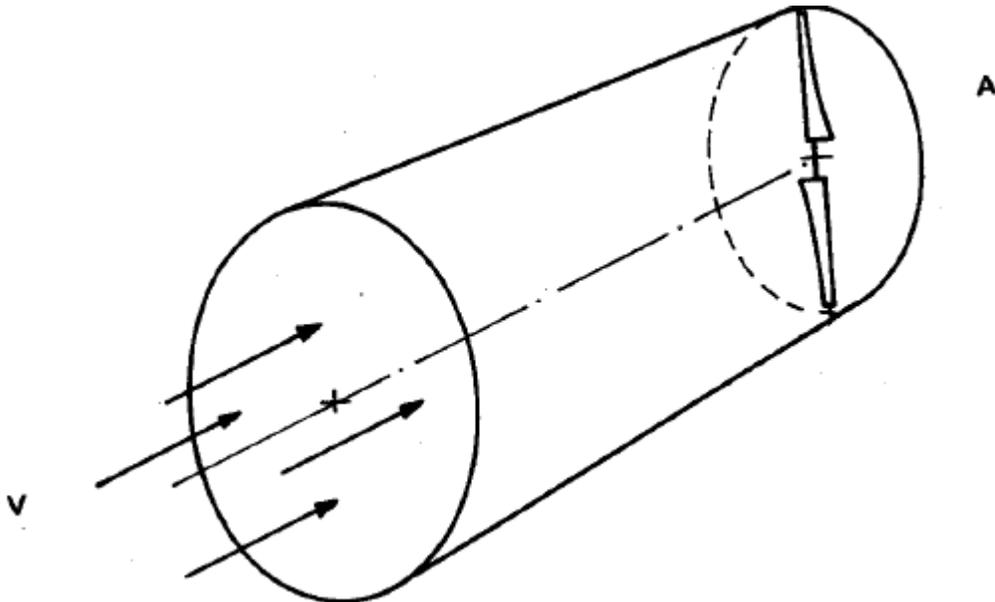
$$\frac{dm}{dt} = \rho AV \quad (A1)$$

Assim, a energia cinética por unidade de tempo, ou potência P (W), do escoamento é dada por:

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} V^2 = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (A2)$$

Onde ρ é a massa específica (valor padrão a $T=15^\circ\text{C}$ é $1,225 \text{ kg/m}^3$), A é a área varrida do rotor (m^2) e V a velocidade livre do vento (m/s).

Figura A1. Representação de escoamento em uma área de um rotor.



Fonte: (LYSEN, 1983, p. 16).

Porém, a potência por unidade de área é denominada densidade de potência P/A (W/m^2) e expressa pela Equação A3:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (A3)$$

É importante notar, a partir da Equação A3, que (LYSEN, 1983, p. 17 e MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 33):

- A potência é proporcional à massa específica. Isso significa dizer que, quanto maior a altitude, obtém-se menos potência à mesma velocidade do vento;
- A potência disponível pelo vento é proporcional à área varrida pelo rotor;
- A potência disponível é proporcional ao cubo da velocidade, ou seja, 10% mais vento significa 30% mais potência.

Quando se tem dados disponíveis da velocidade média anual (aconselha-se utilizar no máximo médias horárias), pode-se estimar a densidade de potência média pela Equação A4:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3 K_e \quad (A4)$$

Onde K_e é definido como o fator padrão de energia (adimensional) pela Equação A5 (LYSEN, 1983, p. 48 e MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009, p. 34):

$$K_e = \frac{\text{quantidade total da potência disponível no vento}}{\text{potência calculada pelo cubo da velocidade média}} = \frac{1}{N \bar{V}^3} \sum_{i=1}^N V^3 = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (A5)$$

Onde Γ é a função gama (ANEXO B), N é o número de horas do ano (8760) e k o fator de forma de Weibull.

Com essa informação, pode-se fazer uma avaliação do recurso eólico local como segue:

- Se $\bar{P}/A < 100 \text{ W}/m^2 \rightarrow$ baixo

- Se $\bar{P}/A \approx 400 \text{ W/m}^2 \rightarrow$ bom
- Se $\bar{P}/A > 700 \text{ W/m}^2 \rightarrow$ ótimo

A velocidade do vento é desacelerada pelo rotor do aerogerador que captura parte da potência disponível no vento. Sendo assim, a potência extraída pelo rotor é dada pela Equação A6:

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (\text{A6})$$

Onde C_p é o coeficiente de potência mecânico da máquina (ou, o seu rendimento aerodinâmico), cujo valor máximo é obtido pela Teoria do Momentum Axial e é equivalente a $16/27$, ou, em outras palavras, um rotor eólico apresenta um rendimento teórico máximo de 59,3% (LYSEN, 1983; HANSEN, 2008 e MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009).

ANEXO B – A função gama

A função gama $\Gamma(x)$, para $x > 0$, é definida como (DEVORE, 2006):

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \quad (\text{B1})$$

A função gama satisfaz a propriedade recursiva de tal modo:

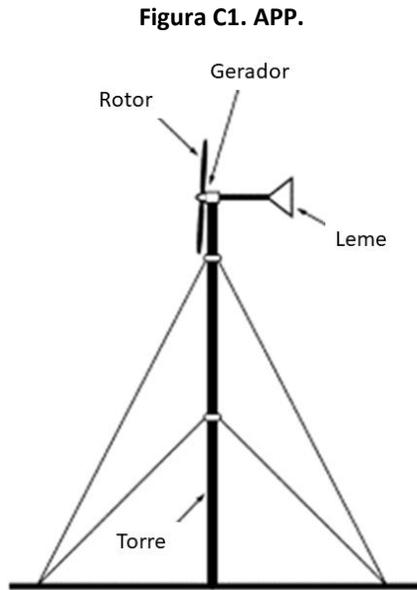
$$\Gamma(x) = (x-1)\Gamma(x-1) \quad (\text{B2})$$

Esta notação pode ser utilizada para todos os números inteiros, exceto para os não-positivos. Porém, quando $x=n$, onde n é um inteiro positivo, então a função gama pode ser escrita como uma função fatorial:

$$\Gamma(n) = (n-1)! \quad (\text{B3})$$

ANEXO C – Configuração atual dos APPs de eixo horizontal

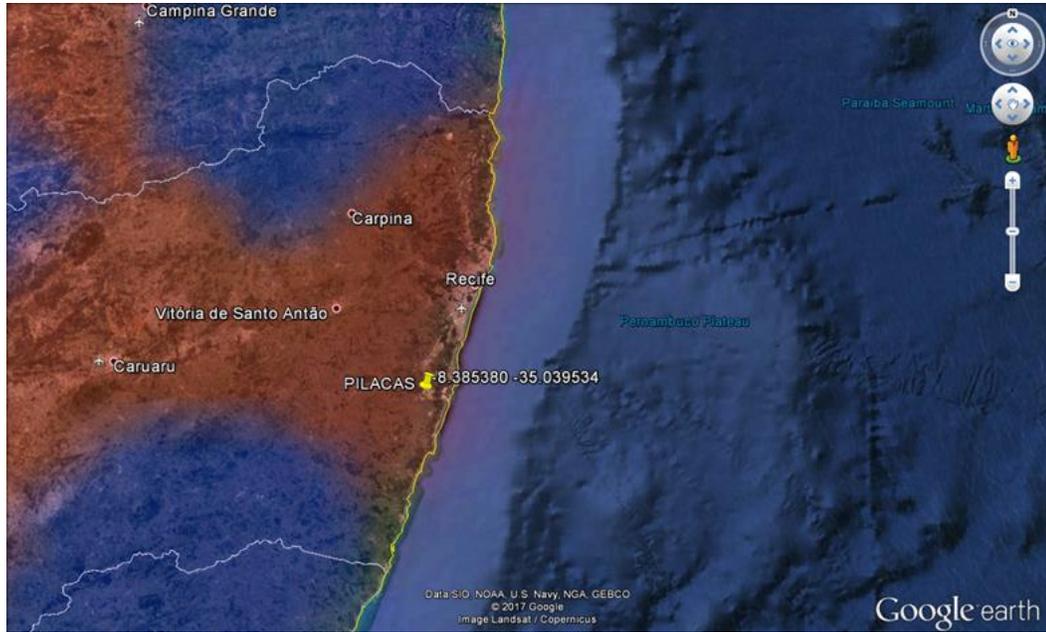
Um aerogerador de pequeno porte de eixo horizontal, atualmente (2017), tem a configuração apresentada na Figura C1.



Fonte: Adaptação do autor.

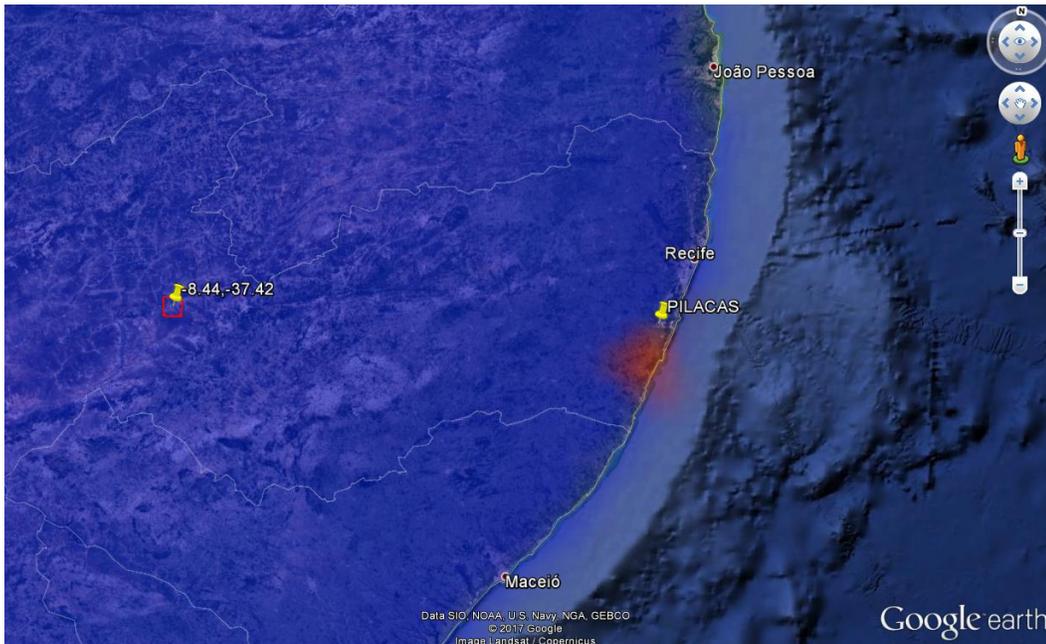
ANEXO D – Regiões da área de ensaios obtidas da Metodologia

Figura D1. Todos os Ensaios no PILACAS pela Metodologia.



Fonte: Adaptado de (GOOGLE EARTH, 2017).

Figura D2. Ensaio de Desempenho de Potência no PILACAS pela Metodologia.



Fonte: Adaptado de (GOOGLE EARTH, 2017).

ANEXO E – Ampliação da Figura 75

