



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

JORDAN FALCÃO DE CARVALHO SILVA



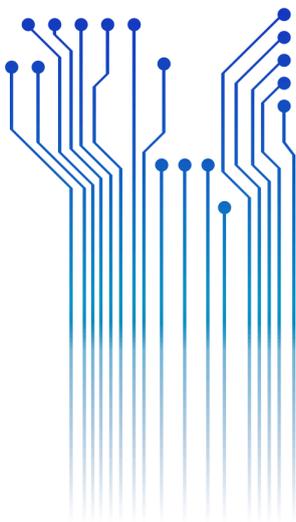
Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE PARQUES EÓLICOS *OFFSHORE*



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2015

JORDAN FALCÃO DE CARVALHO SILVA

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE PARQUES EÓLICOS *OFFSHORE*

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Campina Grande
2015

JORDAN FALCÃO DE CARVALHO SILVA

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE PARQUES EÓLICOS *OFFSHORE*

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo incentivo, dedicação, esforço, amor e carinho; sem o apoio deles seria impossível a realização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela minha vida e pelas bênçãos que Ele tem me proporcionado.

Aos meus pais, Joab e Shirley, por sempre acreditarem no meu potencial, por me apoiarem e incentivarem em todos os momentos, principalmente aqueles mais difíceis, por serem exemplos de pessoas íntegras e por todo amor que sentem por mim.

Ao meu irmão, familiares e pessoas amadas por compreenderem minha ausência e festejarem minha presença. A minha namorada pelo amor, carinho, paciência e compreensão durante o período de elaboração deste trabalho.

A todos meus amigos e colegas, tanto aqueles adquiridos durante a graduação quanto aqueles de longas datas, por partilharem momentos descontraídos e animados.

Aos professores e funcionários desta instituição por terem contribuído para minha formação.

A Tchaikovsky, por toda orientação, paciência e dedicação.

Agradeço em especial aos professores Leimar de Oliveira pela atenção, dedicação, orientação, conhecimentos transmitidos, correções e boas conversas e Roberto Siqueira, pela disponibilidade e atenção imensuráveis, se fazendo presente num momento imprevisto.

*“Existe apenas uma maneira de se evitar as críticas:
não fazer nada, não dizer nada, não ser nada.”*

Autor desconhecido.

RESUMO

Nas últimas décadas, a fonte eólica é a que apresenta maior crescimento dentre as demais fontes energéticas, com a geração eólica em meio marítimo ganhando destaque na perspectiva mundial. Assim, este trabalho procura apresentar o panorama da geração eólica, com ênfase na geração *offshore*, descrevendo o cenário dos países em evidência nesse tipo de tecnologia, ao mesmo tempo que analisa a possibilidade da implementação desse tipo de geração no Brasil. Fez-se uso da pesquisa do tipo bibliográfica, metodologia mais apropriada para esta dissertação, como forma de reunir de forma coesa as informações necessárias no que diz respeito a geração eolielétrica *offshore*. O presente trabalho visa esclarecer os custos e vantagens relacionados a essa fonte alternativa de energia, bem como apresentar as perspectivas futuras a curto e longo prazo.

Palavras-chave: Geração de energia eólica, Parque eólico *offshore*, Fontes alternativas, Renovável.

ABSTRACT

In the last decades, the wind power is the one among all other power sources that shows the highest growth, which the global expectations' spotlight is focused on the wind generation located on seas. Therefore, this paper presents the current situation of wind generation, with emphasis on offshore generation, describing the highlighted countries' scenario with this sort of technology, the same time an analysis concerning the possibility of implementation of this kind of generation in Brazil is done. The most appropriate methodology to this paper, a bibliographic research, was used as a way to gather concisely the mandatory information about the offshore wind generation. This paper aims to clarify the costs and advantages related to this alternative source of energy, as well as to present the long and short term future perspective.

Keywords: Wind energy generation, Offshore wind farm, Alternative sources, Renewable.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Capacidade eólica instalada anual mundial 1997 – 2014.....	17
Figura 2. Capacidade eólica instalada cumulativa mundial.....	17
Figura 3. Capacidades cumulativas de 2014.....	18
Figura 4. Novas capacidades instaladas em 2014.....	19
Figura 5. Capacidade anual instalada por região 2006 – 2014.....	21
Figura 6. Capacidades anuais instaladas dos EUA 2001 – 2014.....	22
Figura 7. Capacidade acumulativa annual do Reino Unido.....	23
Figura 8. Investimentos no setor eólico brasileiro.....	25
Figura 9. Evolução da capacidade eólica instalada no Brasil (MW).....	27
Figura 10. Complementaridade entre a geração eólica e hidrelétrica.....	27
Figura 11. Potencial eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s (50m).....	29
Figura 12. Fundações marítimas fixas típicas.....	31
Figura 13. Participação da capacidade eólica <i>offshore</i> anuais instaladas – Europa 2014.....	32
Figura 14. Capacidade eólica <i>offshore</i> cumulativa 2013 e 2014.....	33
Figura 15. Capacidade eólica por região do Reino Unido.....	34
Figura 16. Capacidade de energia eólica cumulativa na Dinamarca 2005 – 2014.....	36
Figura 17. Capacidades cumulativas e adições anuais da Alemanha.....	37
Figura 18. Parque eólico <i>Global Tech I</i> – Alemanha.....	38
Figura 19. Mapa do potencial eólico <i>offshore</i> estimado para países mais aptos a desenvolver fora da UE.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Capacidade cumulativa total 2014.	19
Tabela 2. Novas capacidades instaladas em 2014.	20
Tabela 3. Capacidade cumulativa instalada e percentual de geração de energia – Dinamarca.....	22
Tabela 4. Empreendimentos em operação no Brasil.....	25
Tabela 5. Empreendimentos em construção no Brasil.....	26
Tabela 6. Simulação de custo com despacho de usinas termelétricas em 2014.....	28
Tabela 7. Custo com pagamentos de usinas eólicas em 2014.....	28
Tabela 8. Desenvolvimento da energia eólica <i>offshore</i> na Alemanha - 2014.....	37
Tabela 9. Características técnicas da turbina eólica <i>AREVA Wind M5000</i>	42
Tabela 10. Potencial de geração de energia eólica em diferentes regiões da margem brasileira.	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AWEA	<i>American Wind Energy Association</i>
BP	<i>British Petroleum</i>
BWE	<i>Bundesverband WindEnergie</i>
BWEA	<i>British Wind Energy Association</i>
CCEAR	Contrato de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado
CELPE	Companhia Elétrica de Pernambuco
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
DEWI	<i>Deutsches WindEnergie Institut</i>
DWIA	<i>Danish Wind Industry Association</i>
DWG	<i>Deutsche WindGuard</i>
EERE	<i>Energy Efficiency and Renewable Energy</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FOWIND	<i>Facilitating Offshore Wind in India</i>
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
InWEA	<i>Indian Wind Energy Association</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
NEA	<i>Nuclear Energy Agency</i>
OECD	<i>Organization for Economic Co-operation and Development</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PPA	<i>Power Purchase Agreement</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
ZEE	Zona Econômica Exclusiva

SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
1.1	Contexto.....	13
1.2	Objetivos.....	14
1.3	Estrutura.....	15
2	Panorama da Geração Eólica.....	16
2.1	Geração Eólica no Mundo.....	16
2.2	Geração Eólica no Brasil.....	24
3	Panorama da Geração Eólica <i>Offshore</i>	30
3.1	Reino Unido.....	34
3.2	Dinamarca.....	35
3.3	Alemanha.....	36
3.4	China.....	39
4	Viabilidade da Geração Eólica <i>Offshore</i> no Brasil.....	40
4.1	Visão Geral.....	40
4.2	Estudos <i>Offshore</i>	41
5	Conclusão.....	44
	Referências.....	46

1 INTRODUÇÃO

O presente Capítulo tem o objetivo de, inicialmente, contextualizar a necessidade crescente por fontes renováveis para geração de energia elétrica, em especial a energia eólica em meio marítimo (de agora em diante referida como energia eólica *offshore*), foco desta pesquisa. Em seguida exibe-se a justificativa e o objetivo desta dissertação. Ao final é apresentada a estrutura deste trabalho a fim de facilitar a compreensão do leitor.

1.1 CONTEXTO

A demanda por energia elétrica mundial tem aumentado incessantemente, não apenas devido ao aumento da produção industrial, mas também devido ao avanço acelerado da automação, do crescimento da população mundial e do crescimento dos países emergentes que cada vez consome mais. Logo, há necessidade de gerar mais energia para atender essa demanda crescente, porém, grande parte da geração de energia elétrica atual é proveniente de combustíveis fósseis, que causam grandes impactos ao meio ambiente.

Desta maneira, a busca por matrizes energéticas eficientes e economicamente viáveis que provoque um impacto reduzido ao meio ambiente vem ganhando força no cenário atual, a exemplo da energia eólica.

A geração de energia elétrica a partir da energia eólica já é uma realidade em alguns países por ser uma alternativa sustentável, prática e mais viável economicamente em comparação a outras fontes renováveis. Entretanto, ainda é pouco expressiva em termos percentuais de geração quando toma-se por base as matrizes energéticas desses países, podendo haver um maior investimento e aproveitamento.

O termo “fontes renováveis” caracteriza um grupo de fontes energéticas na qual a fonte primária é limitada no seu volume num certo instante, porém não se extinguem (incluindo biomassa e hidráulica). No Brasil, devido a sua matriz energética atribuir grande peso às fontes do gênero hidráulica e biomassa, trata-se essas duas fontes

renováveis em separado e faz uso do termo “fontes alternativas” para referir-se às demais fontes renováveis (VIRTEBO, 2008).

O Brasil tem a energia hidrelétrica como sua principal fonte de geração de energia elétrica. Reconhecido pelo seu enorme patrimônio natural, tem uma diversidade de opções para diminuir a sua dependência junto à geração hidrelétrica. E a energia eólica pode ter um papel importante nesse processo, como já ocorre em alguns países da Europa.

O potencial eólico *offshore* mundial é enorme, podendo atender a demanda da Europa mais de sete vezes, e a demanda energética dos Estados Unidos quatro vezes. A geração eolielétrica *offshore* é relativamente uma tecnologia nova, então a tecnologia avançará, conseqüentemente os custos irão diminuir, tornando essa fonte mais eficiente e competitiva em um curto prazo (GWEC, 2015).

A partir deste cenário, a geração eólica *offshore* caracteriza-se como uma geração de energia elétrica em grande escala, podendo facilmente ter projetos superiores a 50 MW e serem instalados próximos a grandes centros consumidores, amplo espaço físico, baixo custo de geração do kWh quando em comparação a outras fontes renováveis e principalmente baixo impacto ambiental. É considerada economicamente viável, apesar do elevado custo de instalação, pois os benefícios se sobressaem em relação ao investimento.

1.2 OBJETIVOS

Diversos são os estudos técnicos sobre a energia eólica no mundo e no Brasil, porém, a tecnologia *offshore* é relativamente nova e aproveitada abaixo do seu grande potencial. O objetivo geral deste trabalho é o de organizar e divulgar informações ao leitor sobre uma tecnologia recente e que ainda não é explorada em nosso país, filtrando de forma integrada literatura estrangeira e/ou nacional que seja relevante sobre o assunto. O objetivo específico é apresentar o panorama atual em relação a geração eolielétrica, em especial a geração eolielétrica *offshore*, tendo em vista que essa fonte já é assunto das principais economias da União Europeia. Ainda retrata uma visão sobre a possibilidade desse tipo de geração no Brasil, com o intuito de uma maior diversificação na matriz energética do país.

1.3 ESTRUTURA

O primeiro Capítulo exhibe uma visão geral introdutória da pesquisa, contextualizando o leitor com o avanço atual da geração eólica, em especial a fonte eolielétrica *offshore*. No mesmo capítulo ainda são expostos os objetivos gerais e específicos da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta os panoramas atuais da energia eólica mundial e brasileiro, focando nos países de destaque nesse tipo de geração. No caso do Brasil, é apresentado o potencial eólico do país assim como a evolução da geração eolielétrica ao longo do anos, dando ênfase aos estados com maiores investimentos e potenciais.

No Capítulo 3 é apresentado o panorama da geração eólica *offshore* em alguns países em destaque no cenário mundial, evidenciando o pioneirismo, os avanços e potenciais futuros.

O Capítulo 4 está focado na análise da diversificação da matriz energética do Brasil a longo prazo e nas possibilidades da geração eolielétrica *offshore*.

O Capítulo 5 explana as conclusões desta pesquisa.

2 PANORAMA DA GERAÇÃO EÓLICA

Tendo em vista que a energia eólica é uma fonte utilizada pelo ser humano há milhares de anos, no bombeamento de água e moagem de grãos, este capítulo explana a evolução desta fonte de energia sendo aproveitada para geração de energia elétrica, e também apresenta projeções futuras para o mercado de energia eólica.

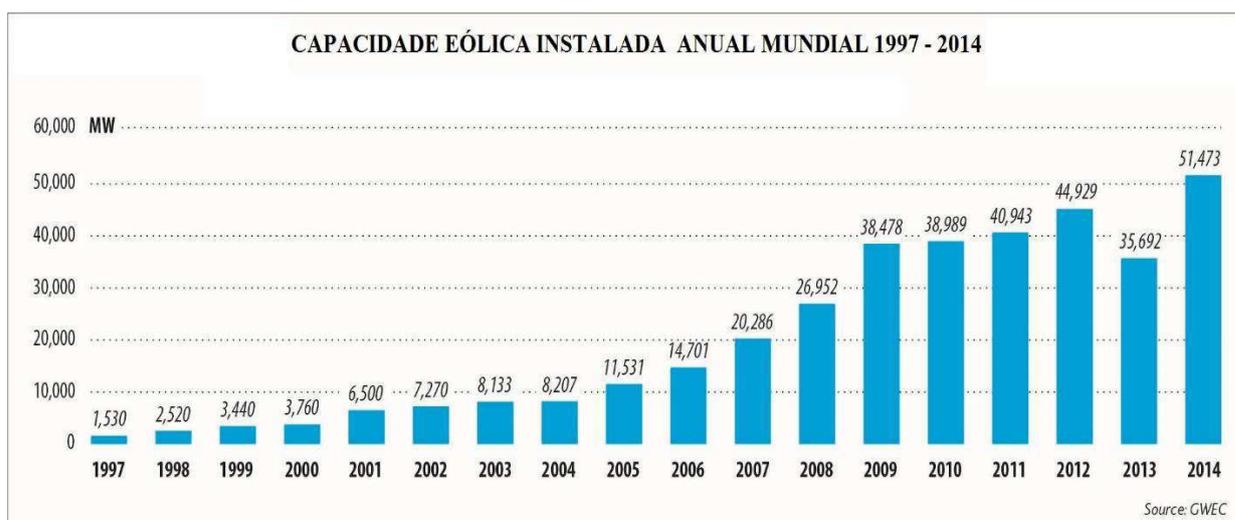
Assim, este Capítulo abrange uma visão geral da energia eólica, apresentando o cenário atual da geração eolielétrica nos principais países que utilizam esse tipo de fonte energética. Depois, o foco do capítulo concentra-se no panorama da geração eolielétrica no Brasil, evidenciando o potencial eólico do país, e sua característica complementar com a fonte hídrica.

2.1 GERAÇÃO EÓLICA NO MUNDO

A primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada em 1976, na Dinamarca (ANEEL, 2005). Atualmente, existem cerca de 268 mil aerogeradores em operação no mundo e milhares de empregos são gerados todos os anos neste setor, o ano de 2013 chegou ao fim com pouco mais de 600 mil pessoas empregadas ligadas da energia eólica (GWEC, 2015).

A geração eolielétrica vem tendo crescimento expressivo nas últimas décadas. Segundo o *Global Wind Energy Council* (GWEC), 2014 foi um ano recorde para a indústria eólica, o crescimento cumulativo foi em torno de 16,2%, e pela primeira vez ultrapassou-se 50 GW instalados em apenas um ano. O recorde anterior foi em 2012, em torno de 45 GW instalados. As capacidades anuais instaladas em todo o mundo são mostradas na Figura 1.

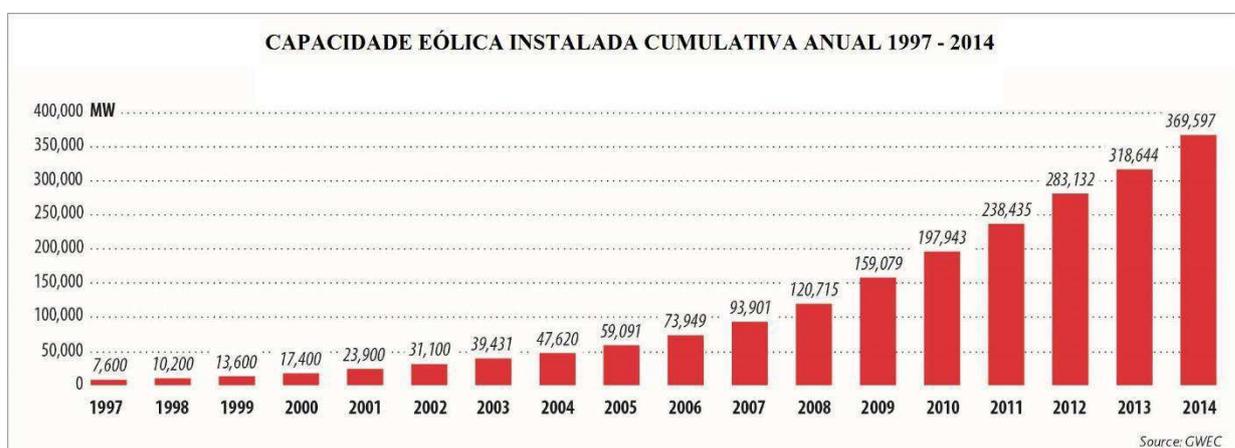
Figura 1. Capacidade eólica instalada anual mundial 1997 – 2014.



Fonte: GWEC.

Nota-se que houve um aumento de 44% na capacidade instalada anual com relação ao ano de 2013, quando 35.66 GW foram instalados, onde as expectativas para o crescimento do mercado de energia eólica foram incertas, devido às instabilidades políticas e a crise econômica da Europa. É ilustrado na Figura 2 as capacidades eólicas cumulativas mundial.

Figura 2. Capacidade eólica instalada cumulativa mundial.



Fonte: GWEC.

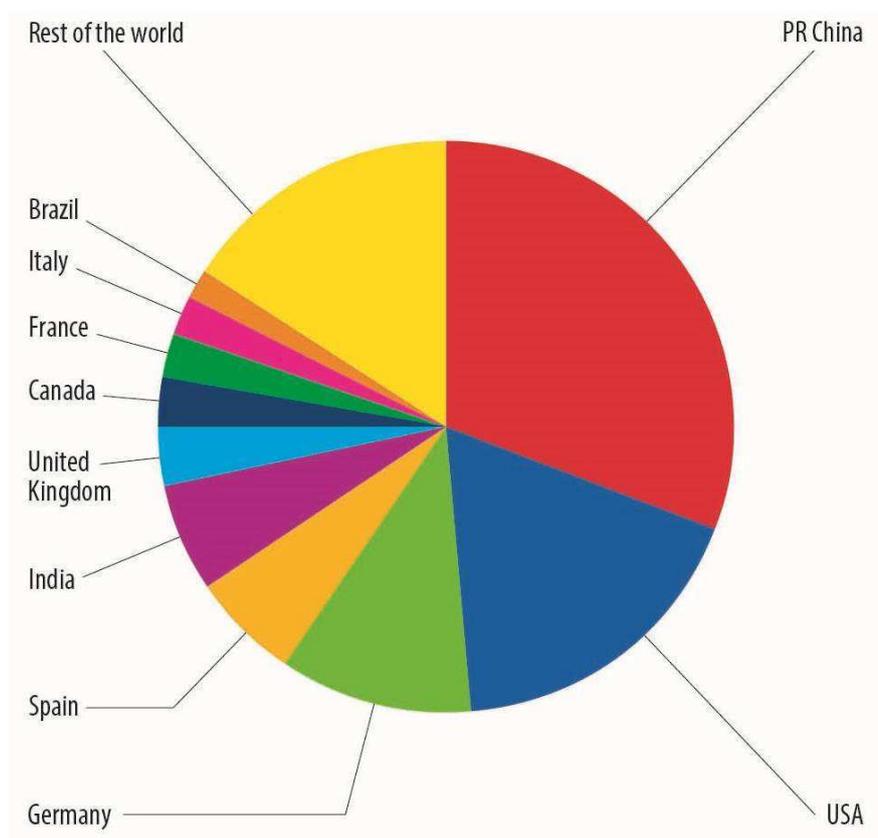
O ano de 2014 encerrou-se com 369.6 GW instalados, precedido de 318.6 GW em 2013, movimentando cerca de US\$ 100 e US\$ 80 bilhões, respectivamente. O primeiro semestre de 2015 foi ainda mais promissor, com mais de 21 GW instalados até o final de junho, atingindo mais de 392 GW. Este aumento é substancialmente maior do que os primeiros semestres de 2014 e 2013, que foi de 17,6 MW e 13,9 MW, respectivamente.

Todas as turbinas eólicas instaladas no mundo, até o primeiro semestre de 2015, geraram cerca de 4% da demanda de eletricidade do mundial.

Houve um aumento de 5,8% na capacidade eólica mundial nos primeiros seis meses de 2015, ultrapassando no mesmo período os anos de 2013 e 2014, que cresceram 4,9% e 5,6%, respectivamente. A previsão da taxa de crescimento para o final de 2015 é de 16,8%, estimando-se uma capacidade cumulativa instalada de mais de 428.000 MW (WWEA, 2015).

Foram identificados 105 países onde a energia eólica é usada para geração de energia elétrica, porém alguns países se destacam no cenário mundial. Podemos ver na Figura 3 os países com maiores capacidades cumulativas instaladas no ano de 2014.

Figura 3. Capacidades cumulativas de 2014.



Fonte: GWEC.

Pode-se visualizar os dez países que são destaque no cenário mundial em termos de energia eólica. As informações acima são melhores ilustradas na Tabela 1.

Tabela 1. Capacidade cumulativa total 2014.

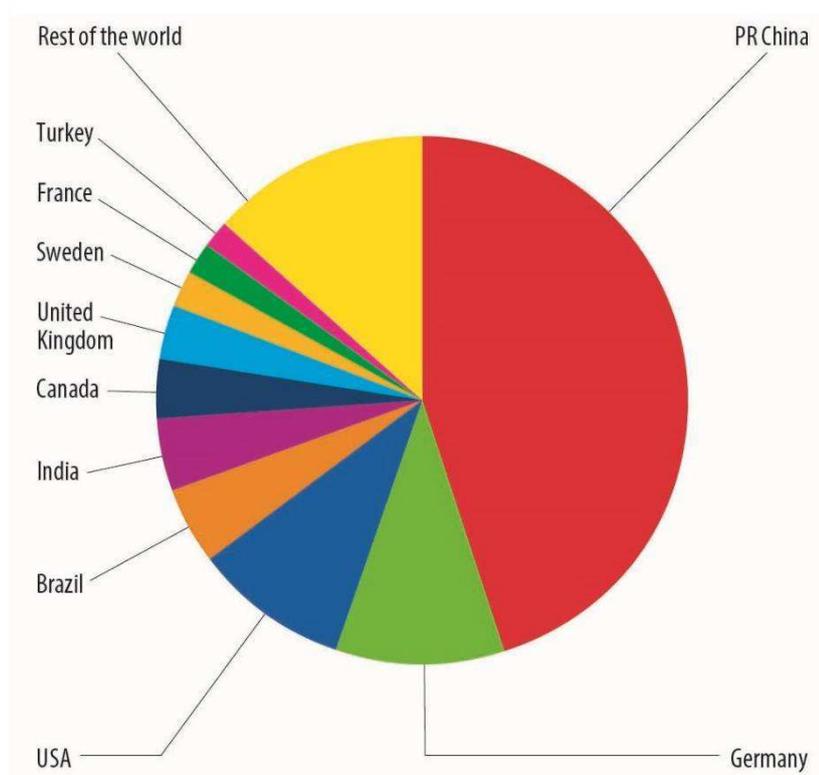
Países	MW	% Compartilhada
China	114.609	31.0
EUA	65.879	17.8
Alemanha	39.165	10.6
Espanha	22.987	6.2
Índia	22.465	6.1
Reino Unido	12.440	3.4
Canadá	9.694	2.6
França	9.285	2.5
Itália	8.663	2.3
Brasil	5.939	1.6
Resto do Mundo	58.473	15.8
Top 10	311.124	84.2
Total Mundial	369.597	100

Fonte: GWEC.

No caso do Brasil, país latino-americano de maior destaque, são considerados os projetos totalmente comissionados, em alguns casos a ligação à rede está pendente.

Muitos desses países também são destaques no que diz respeito a novos projetos de parques eólicos, ou seja, investem cada vez mais. Os dez primeiros países responsáveis pelos maiores valores absolutos instalados no ano de 2014 são mostrados na Figura 4.

Figura 4. Novas capacidades instaladas em 2014.



Fonte: GWEC.

Percebe-se que a **China** também se sobressai no que diz respeito a novas instalações, em virtude da lei de energias renováveis, implantada em 2005, fazendo deste país o maior mercado global para energia eólica desde 2009. Pode-se ver na Tabela 2 os números referentes as essas novas instalações eólicas nos principais países.

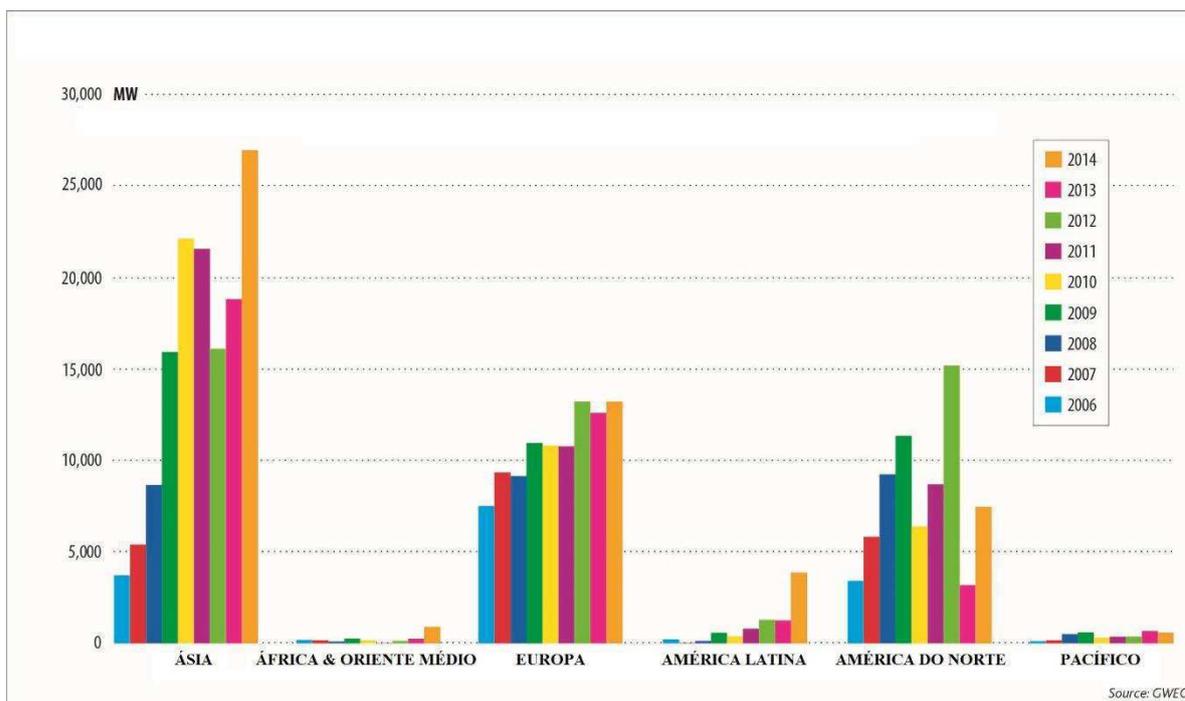
Tabela 2. Novas capacidades instaladas em 2014.

Países	MW	% Compartilhada
China	23.196	45.1
Alemanha	5.279	10.2
EUA	4.854	9.4
Brasil	2.472	4.8
Índia	2.315	4.5
Canadá	1.871	3.6
Reino Unido	1.736	3.4
Suécia	1.050	2.0
França	1.042	2.0
Turquia	8.04	1.6
Resto do Mundo	6.852	13.3
Top 10	44.620	87
Total Mundial	51.473	100

Fonte: GWEC.

A Ásia ultrapassou a Europa como a região com a maior capacidade eólica cumulativa instalada, como ilustrado na Figura 5, em grande parte impulsionada pela China, que ultrapassou a marca histórica de mais de 100 GW instalados até o final de 2014. Um resultado disso foi que, em 2014, como em 2013, a maioria das instalações eólicas foram fora da OECD. Este também foi o caso em 2010 e 2011, e é provável que continue sendo assim num futuro previsível. As instalações recordes são um sinal sólido da recuperação da indústria após uma desaceleração nos últimos anos. China consolidou sua posição de liderança, respondendo por 45,1% do mercado global anual, e 31% das instalações cumulativas globais. Os novos 23 GW instalados também marcaram a primeira vez que um único país já instalou mais de 20 GW em apenas um ano (GWEC, 2015).

Figura 5. Capacidade anual instalada por região 2006 – 2014.



Fonte: GWEC.

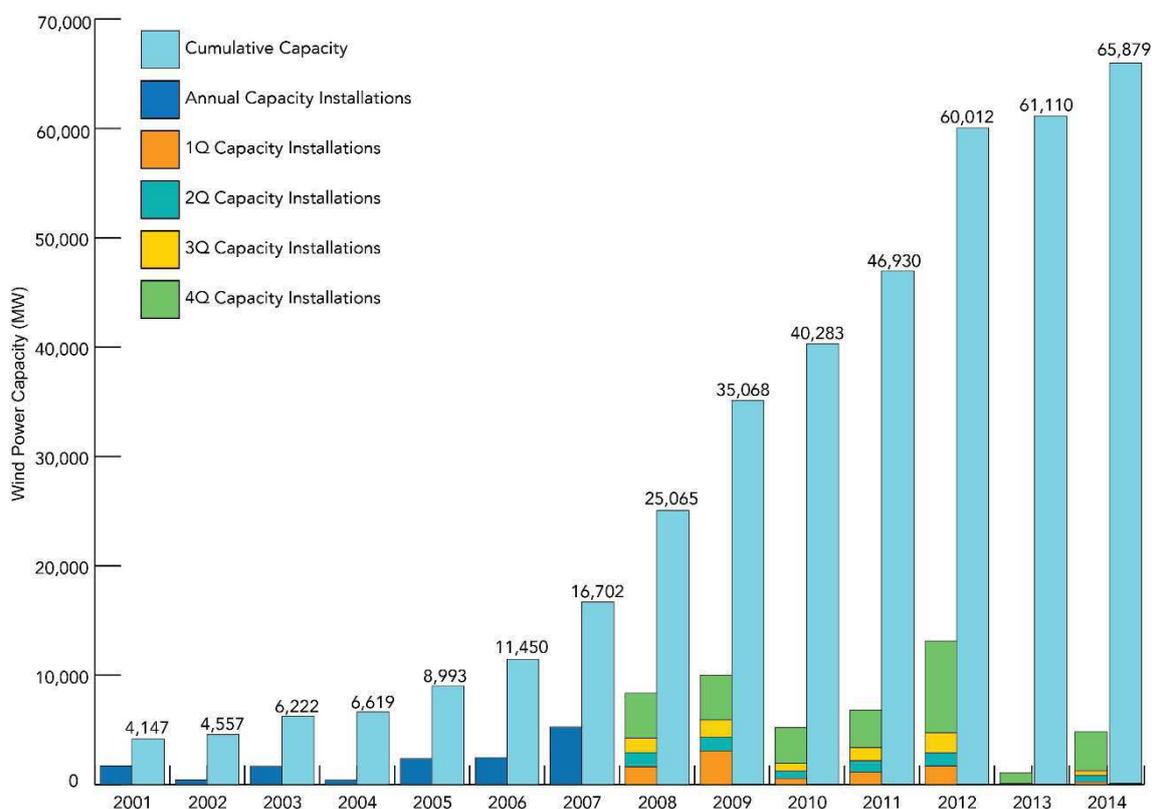
Os **Estados Unidos**, após um ano desacelerado em 2013, pouco mais de 1 GW instalado, instalou cerca de 2.500 novos aerogeradores no ano de 2014, representando 4.854 MW. Com estes resultados, o país mantém-se em segundo lugar com capacidade cumulativa instalada, aproximadamente 66 GW, como mostrado na Figura 6. Os EUA tem desempenhado um papel pioneiro no estabelecimento de mercados de energia eólica e da indústria, bem como no desenvolvimento tecnológico ao longo dos últimos anos (AWEA, 2015).

A **Alemanha** foi o país com o segundo maior crescimento em novas instalações eólicas em 2014, aproximadamente 5,3 GW. É o país europeu que mais cresceu e também com maior capacidade eólica cumulativa instalada atualmente, com quase 40.000 MW. Vem ganhando destaque internacional nos últimos anos em termo de geração eolielétrica e já fechou o primeiro semestre de 2015 com 42.343 MW instalados (DEWI, 2015).

Com umas das melhores condições eólicas mundiais, a **Dinamarca** tornou-se pioneira em energia eólica e líder mundial neste tipo de tecnologia. Em 2014, a indústria eólica dinamarquesa movimentou cerca de DKK 84,4 bilhões (US\$ 12,07 bilhões), um aumento de 7,4% em relação ao ano anterior, além de possuir quase 29.000 pessoas empregadas. Apesar de não estar entre os dez primeiros países em capacidade cumulativa instalada, o país possui quase 40% do seu abastecimento de energia proveniente da

geração eólica e o objetivo é chegar a 50% em 2020, na Tabela 3 vemos a evolução anual das capacidades cumulativas e também o percentual eólico na geração de energia elétrica. O país possui uma capacidade eólica instalada de 4.890 MW, sendo 3.620 MW de geração *onshore* e 1.270 MW *offshore* (DWIA, 2015).

Figura 6. Capacidades anuais instaladas dos EUA 2001 – 2014.



Fonte: AWEA.

Tabela 3. Capacidade cumulativa instalada e percentual de geração de energia – Dinamarca.

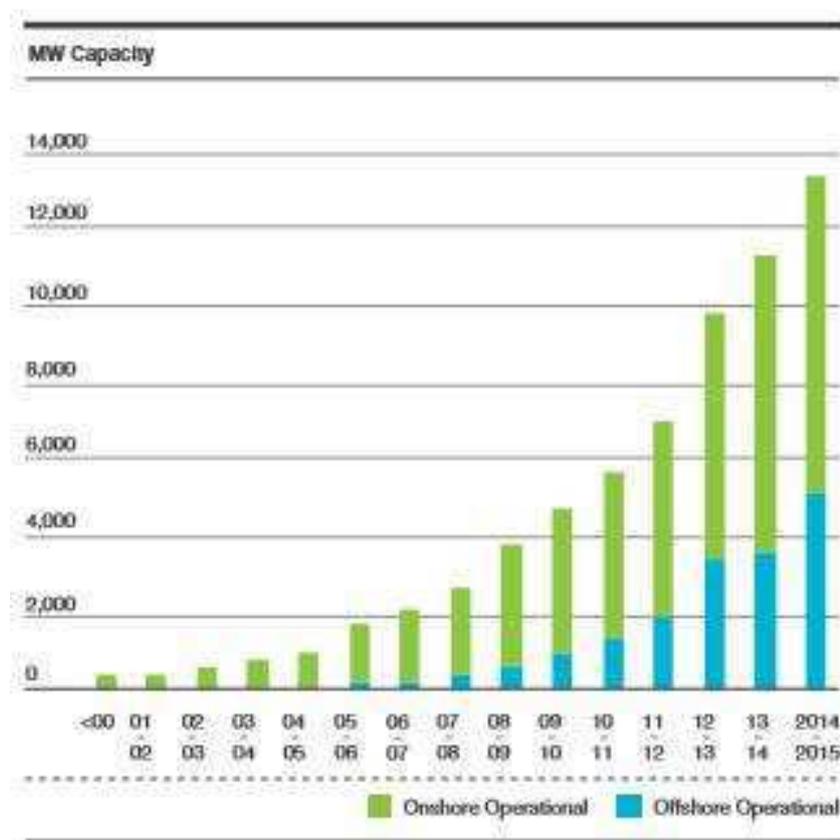
Ano	MW	% Geração
2005	3.096	19
2006	3.104	17
2007	3.093	20
2008	3.140	19
2009	3.469	19
2010	3.789	22
2011	3.955	28
2012	4.168	30
2013	4.814	33
2014	4.890	39

Fonte: DWIA.

A **Índia** encontra-se em quinto lugar em termos de potência eólica instalada, com 23.439 MW até o fim de março de 2015, sendo atualmente considerada um país importante nesse mercado mundial de energia eólica. Segundo o InWEA, o potencial eólico indiano está longe de ser esgotado. Com o nível de tecnologia atual, o potencial eólico *onshore* é de mais de 100 GW, sem levar em consideração o potencial *offshore* (INWEA, 2015).

O primeiro parque eólico instalado no **Reino Unido** foi em 1991, desde então o país evoluiu bastante nesse setor. Em menos de dez anos a participação da geração eolielétrica passou de 1% a 10% da geração elétrica total, fazendo da energia eólica a maior fonte de energia renovável desses países, quase 50% do total de fontes renováveis. A indústria interna conta com mais de 6.600 turbinas *onshore* e *offshore* instaladas e gera mais de 15 mil empregos diretos. O Reino Unido é o sexto colocado em capacidade cumulativa, 13,3 GW atualmente, e destaque-se principalmente pelo seu pioneirismo *offshore*. Pode-se ver as capacidades acumulativas na Figura 7 (BWEA, 2015).

Figura 7. Capacidade acumulativa anual do Reino Unido.



Fonte: BWEA.

Por fim, cabe destacar que a empresa *British Petroleum* (BP), em estudo recentemente publicado, projetou um crescimento expressivo das energias renováveis em relação ao consumo mundial de energia, saindo de cerca de 3% atualmente para 8% em 2035. O estudo indica que as fontes renováveis ultrapassarão a fonte nuclear nos anos 2020s (BP, 2015).

Contudo, é importante destacar que existem incertezas nesses números que fazem previsões futuras. Assim, é válido citar que uma mudança no padrão tecnológico, como, por exemplo, uma tecnologia inovadora, pode gerar um grande rearranjo nas fontes elétricas mundiais.

2.2 GERAÇÃO EÓLICA NO BRASIL

Como visto no tópico anterior, o Brasil teve o quarto maior crescimento em capacidade instalada no ano de 2014, superado apenas pela China, Alemanha e EUA. Segundo o GWEC, é esperado que o Brasil tenha um crescimento forte no ano de 2015, juntamente com Canadá, México e Estados Unidos.

Com 238 usinas no total, o ano de 2014 terminou com 5,9 GW de potência eólica cumulativa instalada, o que representou um crescimento expressivo de 72% de capacidade em relação a dezembro de 2013, quando a capacidade cumulativa instalada era de 3.466 MW (ABEEólica, 2015).

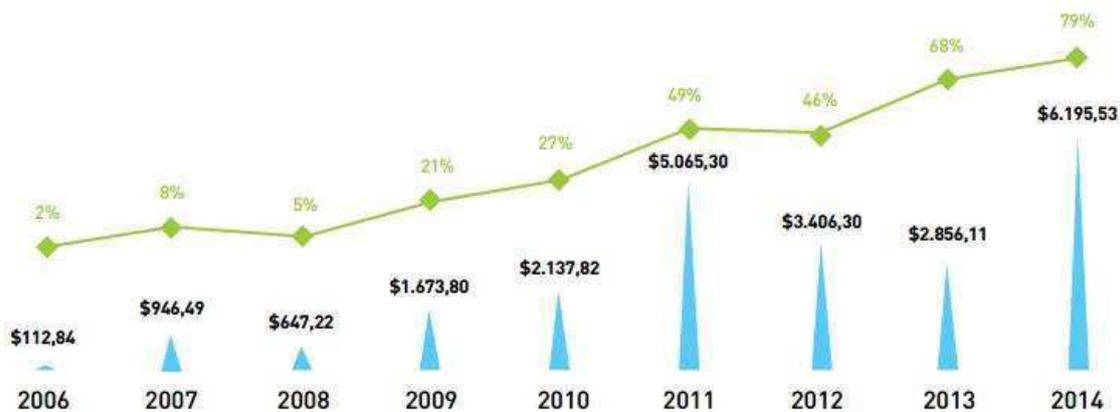
O potencial eólico brasileiro para aproveitamento energético tem sido objeto de estudos desde a década de 70, nos laboratórios do Centro Técnico Aeroespacial – CTA (protótipos de 1 a 2 kW). Apesar de o Brasil possuir um enorme potencial para o aproveitamento da fonte eólica para fins de geração de energia elétrica através dos aerogeradores, grande parte em função da boa qualidade dos seus ventos, é recente a história de desenvolvimento do setor no país se comparada à evolução da fonte eólica em diversos países europeus e dos Estados Unidos, por exemplo.

Desde de meados da década de 90, o cenário de privatizações do setor elétrico despertou interesses pelas fontes alternativas no país. O Brasil teve a instalação do primeiro aerogerador no ano de 1992, por meio de um projeto da Companhia Elétrica de Pernambuco (CELPE), no arquipélago de Fernando de Noronha. Com 23 m de altura e 17 m de diâmetro, a turbina eólica foi instalada com uma capacidade de 75 kW, o suficiente para suprir 10% do consumo da ilha naquela época.

Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), a indústria eólica foi responsável pela criação de cerca de 37.000 postos de trabalho e investimentos de US\$ 6,19 bilhões em 2014, equivalente a 79% do valor investido em fontes renováveis, como pode-se ver na Figura 8. Para os próximos anos são esperados mais 19 mil empregos, R\$ 6 bilhões de investimentos segundo o *Brazil WindPower*.

Figura 8. Investimentos no setor eólico brasileiro.

INVESTIMENTOS NO SETOR EÓLICO



Fonte: ABEEólica/Bloomberg New Energy Finance - BNEF

Total investido em 2014: US\$ 6,2 bilhões

◆ EÓLICA (em milhões) ◆ REPRESENTATIVIDADE (%)

Fonte: ABEEólica.

Atualmente o Brasil possui 4.344 empreendimentos de geração elétrica em operação, totalizando 139.259.038 kW de potência instalada. Desses, 284 são Centrais Geradoras Eólicas. Na Tabela 4, pode-se ver os percentuais e as potências instaladas referente a cada tipo de geração (ANEEL, 2015).

Tabela 4. Empreendimentos em operação no Brasil.

Tipo	Quantidade	Potência Instalada (kW)	%
Central Geradora Hidrelétrica	530	380.992	0,27
Central Geradora Eólica	284	6.848.377	4,92
Pequena Central Hidrelétrica	465	4.820.273	3,46
Central Geradora Solar Fotovoltaica	24	21.231	0,02
Usina Hidrelétrica	197	85.854.188	61,65
Usina Termoelétrica	2.842	39.343.977	28,25
Usina Termonuclear	2	1.990.000	1,43
TOTAL	4.344	139.259.038	100

Fonte: ANEEL.

Percebe-se que a geração eolielétrica encontra-se hoje em terceiro lugar em termos de geração de energia elétrica no Brasil, com quase 5% do total. Atualmente, há 149 novos empreendimentos eólicos em construção, como ilustrado na Tabela 5 número bastante expressivo em comparação com outros tipos de fontes de energia, atrás apenas das usinas hidrelétricas em termos de capacidade.

Tabela 5. Empreendimentos em construção no Brasil.

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	%
Central Geradora Hidrelétrica	1	848	0
Central Geradora Eólica	149	3.614.360	17,84
Pequena Central Hidrelétrica	32	411.218	2,03
Usina Hidrelétrica	10	13.449.342	66,38
Usina Termoelétrica	19	1.434.639	7,08
Usina Termonuclear	1	1.350.000	6,66
TOTAL	212	20.260.407	100

Fonte: ANEEL.

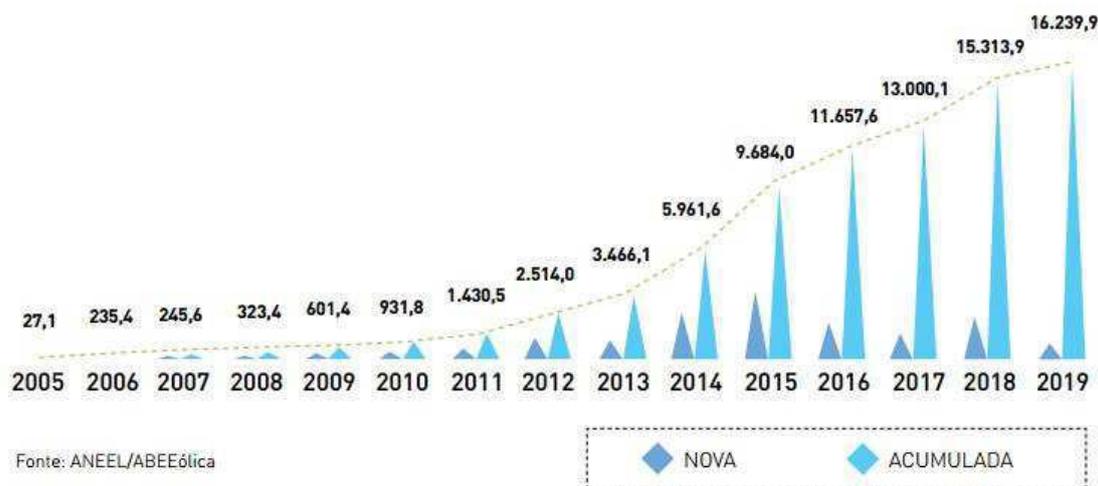
A quantidade de novos empreendimentos eólicos é superior a qualquer outra fonte de energia. Com 3.614 MW sendo construídos, equivalente a 17,84% da capacidade total dos empreendimentos em geração elétrica que estão em construção atualmente, pode-se afirmar que o Brasil está cada vez mais seguindo na direção desse tipo de fonte energética.

Um dos principais motivos para o aumento de investimentos na geração eolielétrica no Brasil foi o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). O programa foi instituído com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos concebidos com base em fontes eólicas, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) no Sistema Elétrico Interligado Nacional – SIN (MME, 2015).

Desde a criação do PROINFA, a produção de energia eólica no Brasil aumentou de 22 MW em 2003 para 602 MW em 2009, e mais de 1000 MW em 2011. Cada vez mais esse número aumenta e a previsão de crescimento é otimista (BWP, 2015).

No Brasil, o crescimento anual médio esperado para a fonte eólica é de 2 GW. Em uma projeção para 2019, segundo publicação do Boletim Anual de Energia Eólica – 2104, pesquisa realizada em parceria entre a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e a Associação Brasileira de Energia Eólica – ABEEólica, o Brasil terá 17 GW de capacidade eólica instalada, o que corresponderá a 9,5% da matriz energética. Essa evolução, juntamente com uma previsão da capacidade cumulativa pode ser vista na Figura 9 (ABEEólica, 2015).

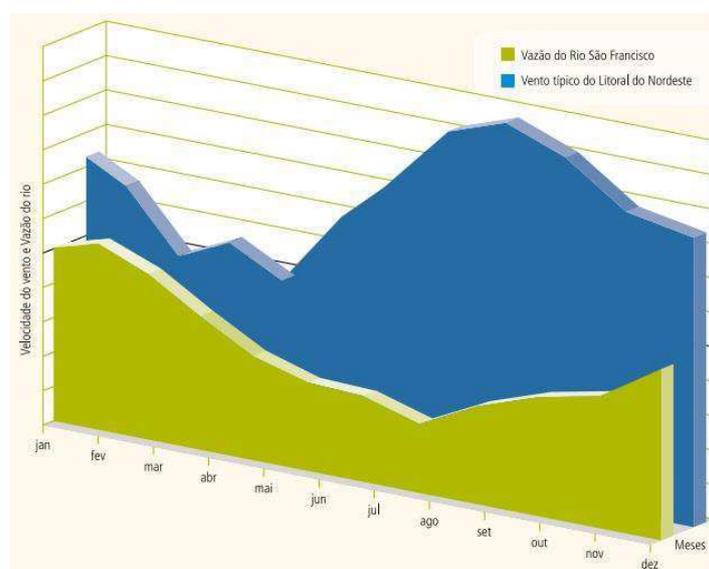
Figura 9. Evolução da capacidade eólica instalada no Brasil (MW).



Fonte: ANEEL/ABEEólica.

É importante destacar a complementaridade da fonte eólica à fonte hídrica. O regime de ventos demonstra que a fonte eólica é essencial para o Sistema Interligado Nacional – SIN, não somente pela geração efetiva, mas principalmente pela sua maior geração justamente no período de seca. A fonte eólica permite uma maior otimização do parque hidrelétrico, firmando-se como energia secundária no período chuvoso, e garantindo a energia (eólica) no sistema no período seco, e/ou preserva o nível dos reservatório. Essa complementaridade é ilustrada na Figura 10, ao apresentar um caso particular da vazão do Rio São Francisco frente à velocidade do vento típico do litoral do Nordeste.

Figura 10. Complementaridade entre a geração eólica e hidrelétrica.



A partir de simulações computacionais realizadas com o intuito de representar a contribuição da fonte eólica para a redução dos custos operativos em 2014, a Associação Brasileira de Energia Eólica apresentou resultados cujo benefício se deu pela diferença entre o ganho obtido com a diminuição do despacho termelétrico com a inserção da geração eólica e o total dos custos incorridos no pagamento das usinas eólicas. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6. Simulação de custo com despacho de usinas termelétricas em 2014.

Descrição	Custo total com despacho de UTE em 2014 (R\$ milhões)
Cenário com eólica	18.393
Cenário sem eólica	26.080
Economia do custo com eólica	7.687

Fonte: ABEEólica.

Por outro lado, calculou-se o custo incorrido com a operação das eólicas, considerando para tal as usinas do PROINFA, as contratadas por disponibilidade, energia de reserva e centrais com outros contratos (para os quais se atribuiu valor médio de R\$ 130/MWh de custo – valor médio dos CCEARs atualizados). Os resultados são ilustrados na Tabela 7.

Tabela 7. Custo com pagamentos de usinas eólicas em 2014.

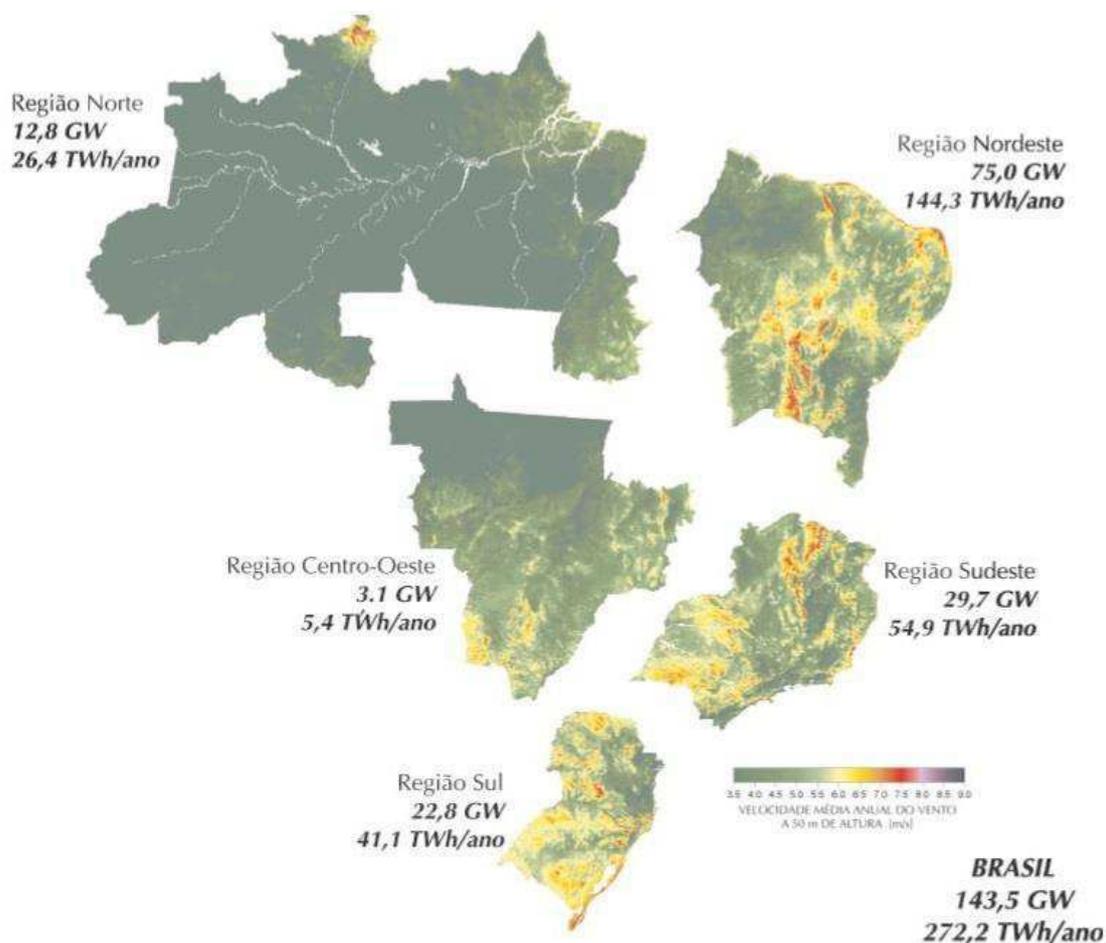
Descrição	Custo total (R\$ milhões)
Energia de reserva	1.191
PROINFA	1.287
CCEAR	57
Outras centrais	51
Total de receita das eólicas	2.589

Fonte: Excelência Energética/ABEEólica.

Comparando os resultados das tabelas 6 e 7, vê-se que a operação das eólicas reduziria o custo com despacho em R\$ 7.687 milhões e que o custo com a receita dessas usinas é de R\$ 2.589 milhões, o benefício líquido da fonte para o sistema, em termos econômicos, foi estimado em R\$ 5.098 milhões no ano de 2014 (ABEEólica, 2015).

Embora o Brasil esteja vivendo um grande desenvolvimento no setor eólico, o último documento oficial sobre o potencial para aproveitamento energético através dos ventos é o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicado em 2001. Neste Atlas, foi estimado um potencial energético através da fonte eólica de 143,5 GW (272,2 TWh / ano), com base em medições a uma altura de 50 metros, dos quais 75 GW (144,3 TWh / ano) localizam-se apenas na região Nordeste, região de maior destaque, conforme pode ser observado na Figura 11.

Figura 11. Potencial eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s (50m).



Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001).

Contudo, estudos mais atuais, porém ainda não oficiais, apontam para um potencial superior a 300 GW, dado que a tecnologia atual dos aerogeradores proporciona a instalação de torres com mais de 100 m de altura, o que permite que as pás dos equipamentos varram uma área maior e em local de velocidades de ventos superiores e mais constantes (MELO, 2012).

3 PANORAMA DA GERAÇÃO EÓLICA *OFFSHORE*

A instalação de parques eólicos *offshore* tem uma série de vantagens em comparação aos parques eólicos *onshore*. As desvantagens comparativas mais visíveis que a geração *onshore* apresenta são a contestação pública devido ao impacto acústico e visual, a dificuldade no transporte de componentes de grande porte (as pás são indivisíveis) e a disparidade da localização geográfica dos ventos continentais com maior potencial energético e dos grandes centros consumidores. No caso da potência nominal das turbinas, ela é limitada pela capacidade dos guindastes terrestres, caminhões, estradas e pontes. No mar, a menor limitação do nível de ruído faz com que os custos das pás (elemento mais caro da turbina) e de componentes mecânicos sejam menores. Existem componentes indivisíveis com mais de 125 toneladas, os quais devem ser erguidos acima de 100 m, tornando a operação de montagem mais dispendiosa e mais complexa, no que diz respeito ao limite dos guindastes terrestres. Em relação à capacidade dos parques, a maioria dos sistemas *onshore* tem menos de 50 MW instalados, em decorrência principalmente da restrição de espaço e custo da terra (VIRTEBO, 2008).

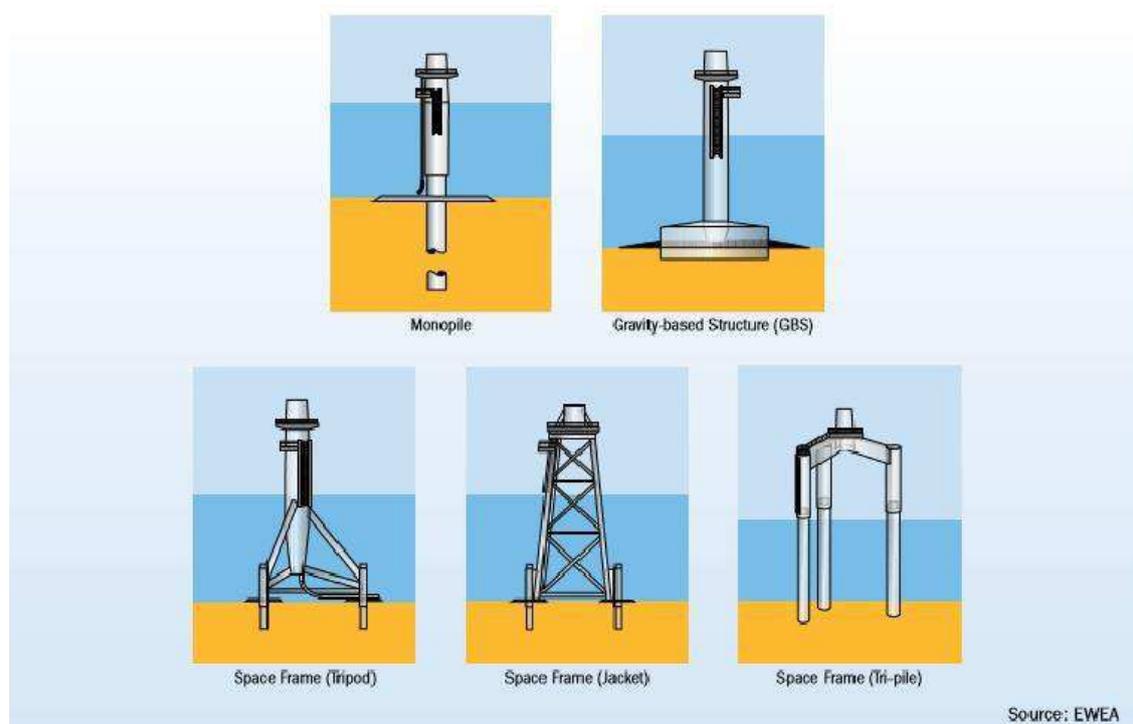
Os maiores desafios para o desenvolvimento do setor eólico *offshore* compreendem o alto investimento para o cabeamento submarino e investimento inicial para aquisição das turbinas, devido estas serem maiores que as disponíveis no mercado para um melhor aproveitamento dos ventos constantes. As dificuldades para um parque eólico *offshore* também são maiores em virtude das condições naturais, pois, a alta salinidade, a carga oriunda de ondas e a dificuldade de acesso elevam os custos de controle de manutenção (VIRTEBO, 2008).

A geração eólica em meio marítimo é considerada uma tecnologia relativamente nova no que diz respeito a geração de energia elétrica provinda de fontes renováveis a serem implementadas em grande escala. É uma tecnologia que está em desenvolvimento mesmo nos países que já operam projetos de energia eólica *offshore*. Mais de 91% da capacidade mundial encontra-se instalada na Europa, principalmente no Mar do Norte, Oceano Atlântico e no Mar Báltico (GWEC, 2015).

O continente europeu é o que mais se destaca nesse tipo de geração, com 2.488 aerogeradores instalados em 74 parques eólicos *offshore* e conectados à rede de 11 países, totalizando uma capacidade cumulativa de 8.045 MW. Dentre essas turbinas instaladas,

78,8% são do tipo Monopilar (*Monopile*), 10,4% são do tipo Fundação de Gravidade (*Gravity Foundation*), 4,7% do tipo *Jacket*, a Fundação Tripé (*Tripod Foundation*) é responsável por 4,1% e a Fundação Tripilar (*Tripile Foundation*) contabiliza 1,9% (EWEA, 2015). Uma ilustração desses tipos de fundações é mostrado na Figura 12.

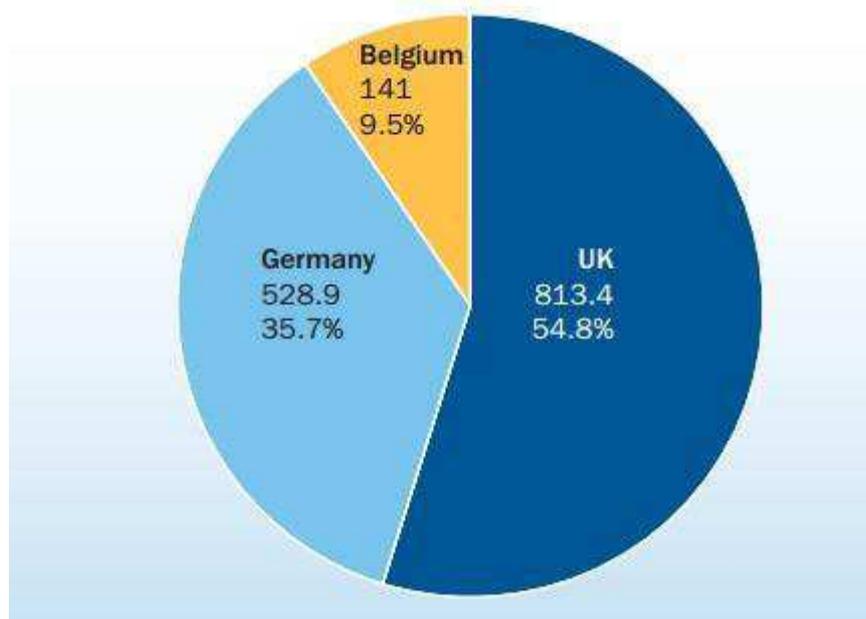
Figura 12. Fundações marítimas fixas típicas.



Fonte: EWEA.

A profundidade média dos parques eólicos no mar instalados na Europa no ano de 2014 foi de 22,4 m e a distância média para a costa continental foi de 32,9 km. Até janeiro de 2015, tinha-se 12 projetos *offshore* em construção, que uma vez completos, irão acrescentar 2,9 GW de capacidade instalada ao continente europeu. Os países com maiores participação em capacidade instalada em 2014 foram o Reino Unido, Alemanha e Bélgica. Os percentuais são ilustrados na Figura 13 (EWEA, 2015).

Figura 13. Participação da capacidade eólica *offshore* anuais instaladas – Europa 2014.



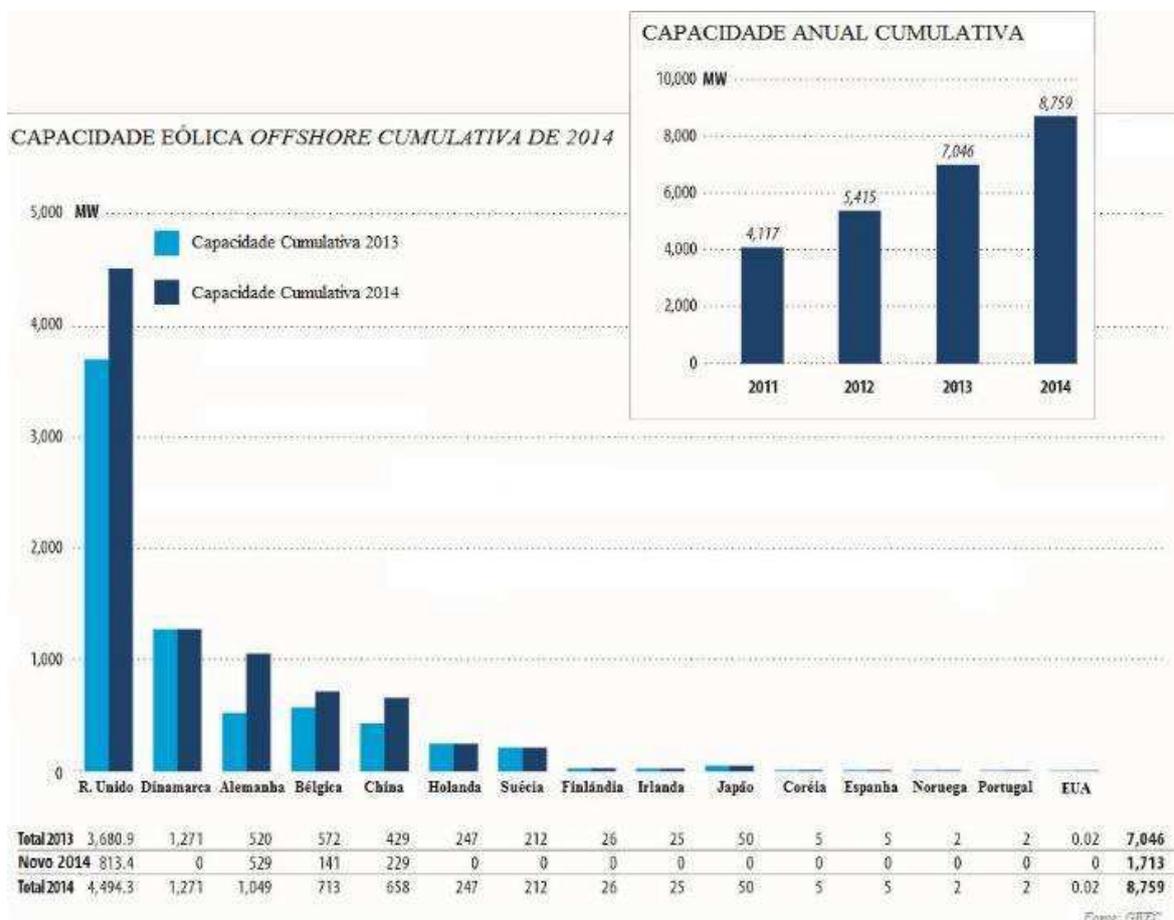
Fonte: EWEA.

A fonte eólica *offshore* é uma componente essencial do objetivo europeu para atingir 20% do consumo final de energia proveniente de fontes renováveis. Outros países vem demonstrando interesse nesse tipo de geração, a China fixou uma meta de 30 GW de instalações costa afora em 2020. Os Estados Unidos têm excelentes recursos eólicos marítimos e muitos projetos estão em desenvolvimento (GWEC, 2015).

Os governos fora da Europa definiram objetivos ambiciosos para a geração eólica *offshore* e o desenvolvimento está começando a decolar na China, Japão, Coreia do Sul, e os EUA. O consórcio liderado pelo FOWIND GWEC (*Facilitating Offshore Wind in India*) está a desenvolver um atlas eólico *offshore* para a Índia, e outros mercados, como o Brasil, têm despertado o interesse em futuro desenvolvimento *offshore*. Enquanto eletricidade a partir de parques eólicos *onshore* já é mais barato do que de energia convencional em um número crescente de mercados, custos relativamente elevados continuam a ser o maior desafio para o desenvolvimento de energia eólica *offshore*. As ações-chave para reduzir os custos incluem: a implantação de turbinas maiores para aumentar a captação de energia, encorajar uma maior concorrência, comissionamento de novos projetos, mantendo volume para cima e enfrentar os desafios da cadeia de fornecimento (EWEA, 2015).

No ano de 2014, foram instalados 1.713 MW de nova capacidade eólica *offshore*, um pouco menos que no ano anterior, atingindo uma capacidade acumulada de 8,8 GW. A China é o país fora da Europa com maior destaque (GWEC, 2015). As capacidades cumulativas são mostrada na Figura 14.

Figura 14. Capacidade eólica *offshore* cumulativa 2013 e 2014.



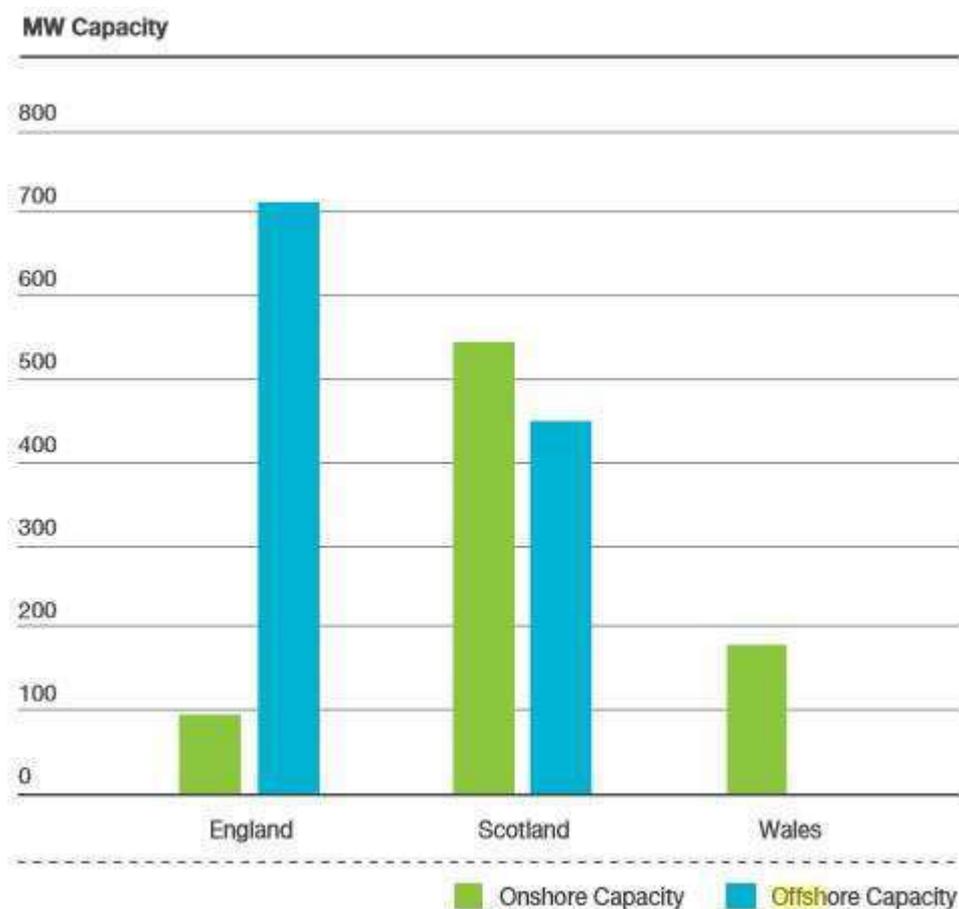
Fonte: GWEC.

Para um melhor aproveitamento da geração eolielétrica *offshore* e consequente redução de custos, é necessário um quadro legislativo de suporte, e novos projetos devem ser desenvolvido para águas profundas, a fim de explorar o grande potencial eólico do Atlântico, Mediterrâneo e águas profundas do Mar do Norte. Subestruturas comerciais atuais são economicamente limitados a profundidades máximas de água de 40 m a 50 m. O ambiente profundo *offshore* começa em profundidades superiores a 50 m. A seguir descreve-se o setor eólico *offshore* em alguns países de interesse (EWEA, 2013).

3.1 REINO UNIDO

Reino Unido entrou em *peaking* em 1999. Coincidência ou não, este foi o ano em que foi lançado o primeiro projeto *offshore* do Reino Unido, *Blyth Offshore Wind Farm*, com 15 turbinas instaladas e capacidade de geração próxima dos 100 MW. A política de obrigação renovável foi implementada no país em 2002 como a primeira ação em prol da meta de 10% da geração de sua eletricidade a partir de fontes renováveis até 2010. O governo britânico reconheceu desde o início que a fonte eólica *onshore* não seria suficiente para atingir os objetivos da política energética e que a tecnologia eólica *offshore*, maremotriz e energia das ondas seriam indispensáveis para o alcance das metas em grande escala (VIRTEBO, 2008).

Figura 15. Capacidade eólica por região do Reino Unido.



Fonte: RenewableUK.

O Reino Unido continua a liderar a indústria *offshore* do mundo em termos de ambas as instalações anuais e cumulativas em 2014, com capacidade instalada maior que

o resto do mundo combinado, até o fim de 2014 eram 4.494 MW instalados, equivalentes a 51% da capacidade eólica *offshore* mundial. Cinco parques eólicos *offshore* foram instalados e conectados à rede no país: *Methil Demo*, *West of Suddon Sands*, *Gwynt y Mor*, *Westernmost Roush* e *Humber Gateway*, totalizando 219 turbinas conectadas em 2014, com capacidade de geração de 813 MW (GWEC, 2015). Os percentuais de capacidade dos países que compõem o Reino Unido até junho de 2015 são visualizados na Figura 15.

Entre julho de 2014 e ao final de junho de 2015, o Reino Unido viu um adicional de 648 MW *onshore* e 1.394 MW *offshore*, dando uma capacidade total de 13.313 MW. Este crescimento significa que a energia eólica já fornece 10% das necessidades de energia do país. Este crescimento significa que, no ano passado, £ 1,25 bilhão foi investido no Reino Unido por causa da energia eólica, sustentando 15.500 postos de trabalhos diretos e 15.078 indiretos. Esses números do emprego mostram uma indústria amplamente estática em números (RENEWABLEUK, 2015).

3.2 DINAMARCA

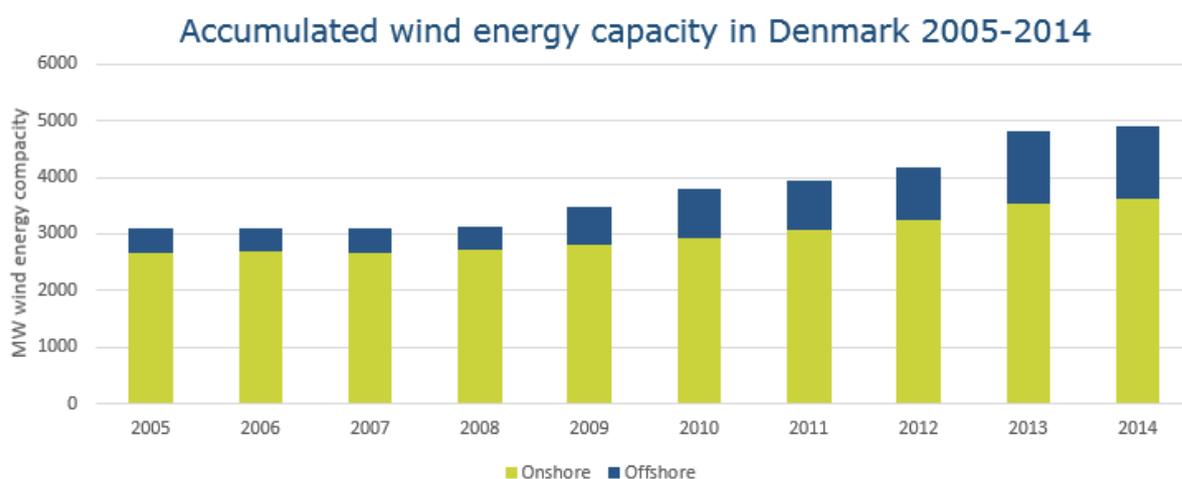
A Dinamarca possui uma política de longo prazo para o setor energético. Desde então, o governo tem implementado planos em prol das fontes renováveis de energia, nos quais os planos miram 4 GW para 2030. No ano de 1997, a Dinamarca estava sob a liderança de um governo com forte ideologia pró-ambiental, obtendo assim apoio governamental para se estabelecer parques eólicos marítimos para teste na costa do país, resultando na instalação de dois parques: *Nysted*, com 165 MW de capacidade instalada e *Horns Rev*, com 160 MW. Tornando-se assim, o primeiro país com a apresentar projetos de geração eolielétrica *offshore* em escala comercial no ano de 2001. É importante mencionar que o aprendizado adquirido pelas empresas dinamarquesas durante esse período gerou grande capacitação para esse setor, e hoje essas empresas desenvolvem projetos *offshore* em outros países como Reino Unido e Alemanha (VIRTEBO, 2008).

É o segundo país no ranking de geração de energia elétrica proveniente de fonte eólica *offshore*, apesar de 2013 ter sido um ano de praticamente estagnação no setor eólico dinamarquês. Os níveis de emprego em 2014 seguiu o aumento do volume de negócios total das exportações e, no entanto, com margens ligeiramente menores. Até o final de

2014 existiam mais de 28 mil empregos na indústria eólica dinamarquesa, o que representa um aumento de 1.405 colaboradores em comparação a 2013 (DWIA, 2015).

Hoje, mais de 40% do abastecimento de energia da Dinamarca vem de energia eólica e o plano é chegar a 50% até 2020, tal como estabelecido na Lei de Energia de 2012. Em 2050, o plano é para a Dinamarca para ser 100% livre de combustíveis fósseis e a energia eólica irá tornar-se uma parcela majoritária da matriz energética. A capacidade total de energia eólica na Dinamarca era 4.890 MW até o final de 2014, 3.620 MW *onshore* e 1.271 MW *offshore*. A evolução das capacidades anuais do país é mostrado na Figura 16 (DWIA, 2015).

Figura 16. Capacidade de energia eólica cumulativa na Dinamarca 2005 – 2014.



Fonte: DWIA.

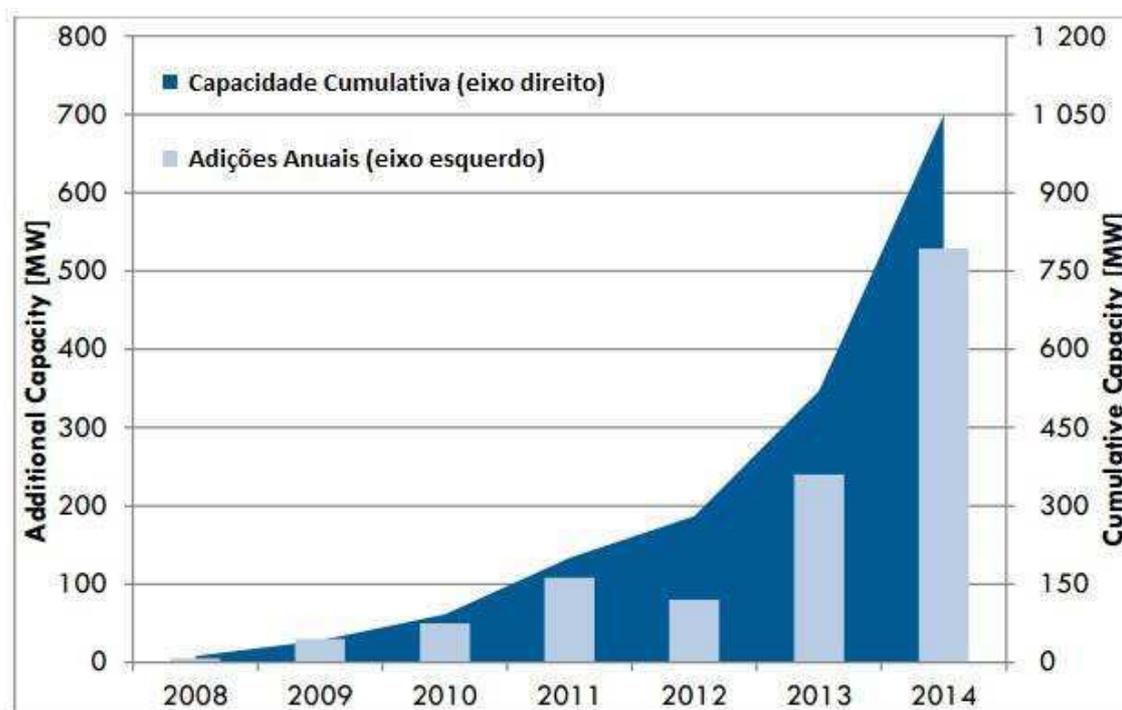
3.3 ALEMANHA

A Alemanha, maior economia europeia, decidiu erradicar o uso de fonte nuclear para geração de energia elétrica desde 2011, apesar de dominarem essa tecnologia e serem fornecedores de reatores. Atualmente, a fonte nuclear é responsável por 16% da geração total de energia elétrica do país, fornecida a partir de oito reatores. O custo para tentar substituir a energia nuclear por energias renováveis foi estimado pelo governo em torno de cerca de € 1.000 bilhões, sem qualquer garantia de um resultado confiável, e com o aumento da dependência do carvão, que hoje já é responsável por quase 50% da geração de eletricidade do país (WNA, 2015).

O mercado de energia eólica *offshore* alemão ultrapassou a marca de 1 GW em 2014, mais do que duplicando tanto o mercado anual de 2013 quanto a capacidade

cumulativa do país. No ano de 2014, 142 turbinas eólicas *offshore* foram instaladas e conectadas à rede na Alemanha, representando uma capacidade anual de 529 MW, elevando para 258 o número total de turbinas eólicas *offshore* localizados nos mares do Norte e Báltico, e a capacidade total marítima no país até 1049 MW (BWE, 2015). Pode-se ver as capacidades cumulativas e adicionais na Figura 17.

Figura 17. Capacidades cumulativas e adições anuais da Alemanha.



Fonte: DWG.

As informações das capacidades acima juntamente com a descrição de turbinas eólicas *offshore*, conectadas ou não à rede, são melhores visualizadas na Tabela 8.

Tabela 8. Desenvolvimento da energia eólica *offshore* na Alemanha - 2014.

Status do Desenvolvimento da Energia Eólica <i>Offshore</i>		Capacidade (MW)	Número de Turbinas
Novas Instalações 2014	Turbinas <i>offshore</i> conectadas	528,9	142
	Turbinas <i>offshore</i> não-conectadas	1.218,1	268
	Novas fundações	-	211
Capacidades Cumulativas	Turbinas <i>offshore</i> conectadas	1.049,2	258
	Turbinas <i>offshore</i> não-conectadas	1.303,1	285
	Novas fundações	-	220

Fonte: DWG.

A Alemanha foi o segundo país que mais instalou e conectou projetos *offshore* em 2014, ficando atrás apenas do Reino Unido. Além das turbinas eólicas *offshore* conectadas à rede, a construção de mais 268 turbinas *offshore*, totalizando 1,2 GW, foram

concluídas e programadas para entrar em operação ao longo de 2015, e mais de 220 fundações já foram colocadas em posição. O tamanho médio de uma turbina eólica *offshore* na Alemanha em 2014 teve um capacidade de 3,7 MW, um diâmetro do rotor de 120 m e uma altura de 89 m (GWEC, 2015).

A quebra de um gigawatt de capacidade instalada no mar da Alemanha correspondeu a um volume de investimento de € 4 bilhões (US\$ 4,5 bilhões). Além disso, exportações de turbinas, fundações e de tecnologia de conexão de redes representaram cerca de um bilhão de euros. Isso mostra a importância industrial de energia eólica *offshore* no país, empregando cerca de 19.000 pessoas, com um volume de negócios em torno de € 1,9 bilhão (US\$ 2,2 bilhões) em 2013 (GWEC, 2015).

Em 2015, até 2 GW de capacidade eólica offshore é esperado para ser conectado à rede, elevando a capacidade total de offshore até 3 GW, o que corresponde a um investimento de 10 bilhões de euros no mercado alemão de energia eólica *offshore*. O maior parque eólico alemão, construção concluída durante o primeiro trimestre de 2015, é o *Global Tech I*, parque eólico com 80 turbinas de 5 MW de capacidade cada, totalizando 400 MW de capacidade instalada. Espera-se que a Alemanha lidere o mercado *offshore* da Europa 2015 (GWEC, 2015).

Figura 18. Parque eólico *Global Tech I* – Alemanha.



Fonte: Página do *Global Tech I*.

3.4 CHINA

Nenhum país depende tanto do carvão quanto a China e no país nenhuma indústria depende mais do carvão do que a indústria de geração de energia elétrica. A China é atualmente o maior alvo da indústria eólica mundial, em 2004 foi aprovada a Lei de Energias Renováveis que prevê um sistema de aquisição de energia por preço pré-estabelecido, o que dá condição de serem estabelecidos por meio de contratos de compras de energia de longo prazo (*Power Purchase Agreement – PPA*). É importante ressaltar que o governo chinês deu uma forte contribuição para o mercado. Do lado da oferta, criou condições favoráveis para a entrada de fabricantes estrangeiros de turbinas eólicas, porém também incentivou o crescimento da indústria eólica nacional. Do lado da demanda, o governo obrigou as distribuidoras de energia a adquirirem um nível mínimo de energia eólica por meio de contratos de longo prazo com os produtores (VIRTEBO, 2008).

A China foi o terceiro país no ranking de novas capacidades eólicas *offshore* instaladas no ano de 2014, depois do Reino Unido e da Alemanha, sendo o país de maior destaque fora do continente europeu. O país instalou 229.3 MW de novas instalações eólicas *offshore* em 2014, totalizando uma capacidade cumulativa de 657,9 MW. A maioria dos projetos eólicos *offshore* estão localizados em águas rasas, próximos a costa continental, onde o mar seca (ou quase isso) na maré baixa. A maioria dos projetos em águas profundas estão em desenvolvimento ou estão no início da construção (GWEC, 2015).

Um verdadeiro impulso para o setor ocorreu depois que o governo havia chegado a um acordo com o fato de que sua meta de 5 GW de capacidade eólica *offshore* até 2015 seria difícil de alcançar. Em agosto de 2014, a *National Energy Agency* (NEA) publicou uma lista de 44 projetos eólicos *offshore*, totalizando 10,53 GW, com capacidade máxima de 250 MW na lista de projetos final publicado em dezembro. Estes projetos deverão ser desenvolvidos nos próximos anos. Além disso, os governos locais têm também introduziu uma série de medidas para atrair investimentos para a negócios *offshore* a nível provincial. Por exemplo, o governo de Xangai introduziu uma medida para dar um novo impulso para a geração eolielétrica *offshore*, adicionando RMB 0,2 / kWh (€ / US\$ 0,03) na tarifa de *Feed-in* (mecanismo político destinado investimentos em tecnologias de energia renováveis) atual. Este incentivo adicional vai tornar os projetos mais atraentes para os desenvolvedores e investidores (GWEC, 2015).

4 VIABILIDADE DA GERAÇÃO EÓLICA *OFFSHORE* NO BRASIL

4.1 VISÃO GERAL

A partir das exposições do panorama da geração eolielétrica, *onshore* e *offshore*, a nível mundial e do panorama da geração eolielétrica *onshore* no Brasil, este capítulo apresenta a possibilidade de integração desse tipo de geração ao Sistema Interligado Nacional – SIN, ao mesmo tempo que explana o potencial eólico *offshore* no litoral brasileiro.

Conforme foi visto na Figura 11 do Capítulo 2, o Brasil possui um potencial eólico continental estimado em 143,5 GW, que é maior que a demanda atual de 140 GW, segundo a ANEEL. Contudo, o potencial eólico *onshore* do Brasil seja consideravelmente grande, apenas uma pequena parcela poderia ser utilizada adequadamente, devido aos impactos ambientais, o relevo e a ocupação das terras. Em termos da geração eólica marítima, os ventos não encontram barreiras naturais, os impactos ambientais são minimizados e não há restrição de área relevante.

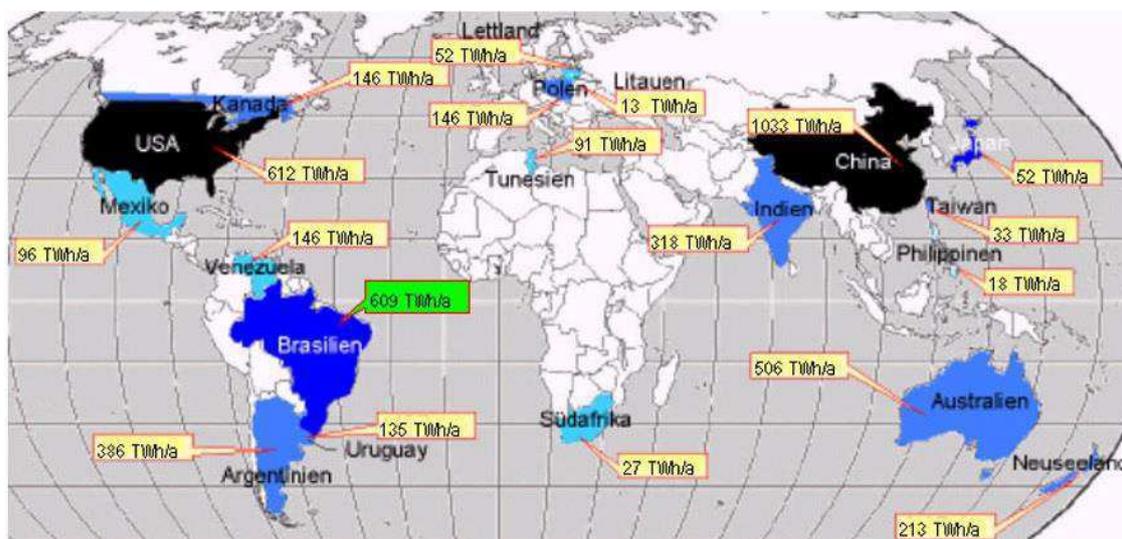
Ao planejar sistemas eólicos *onshore* e *offshore* em paralelo, antes do esgotamento dos locais úteis de terra, como acontece no Reino Unido, o Brasil poderia aplicar uma tática análoga à britânica, visando os seguintes objetivos:

- Favorecer a aceitação pública frente à tecnologia eólica, preservando o solo próximo a grandes centros atividades diferentes da geração eolielétrica e reduzindo os impactos visual e auditivo;
- Aumentar o uso de recursos naturais *offshore*, fazendo utilização de *know-how* prévio e útil à nova forma de geração que se apresenta;
- Gerar empregos na indústria naval e em outras indústria de bens de capital;
- Ter opção adicional e de rápida implantação para elevar a segurança da oferta de energia a grandes centros de carga industriais ou urbanos próximos ao litoral (VIRTEBO, 2008).

4.2 ESTUDOS *OFFSHORE*

Os mercados potenciais para a indústria eólica *offshore* foram avaliados por Siegfriedsen, Lehnhoff & Prehn. O Brasil é indicado como o 3º maior potencial de energia *offshore* mundial, cerca de 609 TWh/ano, atrás dos EUA e da China, com 612 TWh/ano e 1.033 TWh/ano, respectivamente. Um mapa no qual consta o potencial energético *offshore* estimado para os países com maior aptidão é ilustrado na Figura 19.

Figura 19. Mapa do potencial eólico *offshore* estimado para países mais aptos a desenvolver fora da UE.



Fonte: AERODYN.

O estudo também relata sobre a metodologia empregada para elaborar uma escala de pontuação geral dos países avaliados e uma escala de medida a ser aplicada quanto a viabilidade para projetos eólicos *offshore*. Essa escala de pontuação origina um índice de viabilidade de projetos *offshore*, esse índice considera condições econômicas para energia eólica, profundidade da água nos sítios potenciais, ventos da região marítima, distância em relação a rede elétrica adequada mais próxima, a infraestrutura do país e a predisposição que o país apresenta para realizar projetos *offshore*. O Brasil possui um índice de viabilidade superior aos índices dos EUA e da China, por preencher mais os requisitos e possuir uma indústria *offshore* de renome. Todavia, atribuiu-se que o país exprime um baixo nível de motivação para o desenvolvimento desses projetos.

Outro estudo no Brasil foi realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, e pela primeira vez foi avaliado o potencial energético *offshore* para toda a margem brasileira. Entre agosto de 1999 e dezembro de 2009 foram obtidos dados

do satélite *QuikSCAT*, e estimou-se que o potencial de energia *offshore* na Zona Econômica Exclusiva brasileira, ZEE, é cerca de 12 vezes maior que o potencial *onshore*, sendo apto a promover o desenvolvimento sustentável do Brasil em longo prazo.

Para estimar-se o real potencial de geração de energia, simulou-se a utilização de turbinas geradores do tipo *AREVA Wind M5000*, as características técnicas desse modelo de turbina são descritas na Tabela 9.

Tabela 9. Características técnicas da turbina eólica *AREVA Wind M5000*.

Características técnicas – AREVA Wind M5000	
Potência nominal	5 MW
Velocidade mínima	4 m/s
Velocidade máxima	25 m/s
Velocidade nominal	12 m/s
Diâmetro do rotor	116 m
Área do rotor	10.568 m ²
Eficiência de conversão	39,55%

Fonte: ORTIZ, 2011.

A média da magnitude do vento offshore no Brasil apresentou variação entre 7 e 12 m/s, com valores mínimos próximos à costa de São Paulo e valores máximos próximos à costa de Alagoas e Sergipe. Três regiões de alta magnitude de vento são destacadas:

- Margem de Sergipe e Alagoas;
- Rio Grande do Norte e Ceará;
- Rio grande do Sul e Santa Catarina.

O potencial de energia gerada em cada pixel variou entre 4,7 MW e 21.2 MW. Os potenciais totais regionais são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Potencial de geração de energia eólica em diferentes regiões da margem brasileira.

Distância da Costa		Intervalo Baltimétrico	
0 a 10 km	57 GW	0 a 20 m	176 GW
0 a 50 km	259 GW	0 a 50 m	399 GW
1 a 100 km	514 GW	0 a 100 m	606 GW
0 a 200 Mm	1.780 GW	-	-

Fonte: ORTIZ, 2011.

É importante notar que esse potencial de geração energética até 100 m de profundidade, 606 GW, é mais de quatro vezes maior que a geração de energia total do Brasil atualmente. Também vale ressaltar que o potencial de energia até 10 km da costa, 57 GW, pois representa uma grande quantidade de energia que pode ser gerada próxima do litoral, reduzindo a complexidade das estruturas operacionais. O estudo conclui que a

margem brasileira apresenta um grande potencial para geração eólielétrica, principalmente na região Nordeste, com destaque para os estados de AL, CE, RN e SE (ORTIZ, 2011).

Além dos dados apresentados nesses estudos, outros fatores corroboram com esse tipo de geração de energia. Os maiores centros geradores de eletricidade no Brasil encontram-se no interior, enquanto a maior demanda de energia elétrica é litorânea, grande parcela da população nacional se encontra numa faixa de até 200 km do litoral. Com isso, 11% da eletricidade produzida no país é dissipada na transmissão e 27% do custo da eletricidade refere-se ao transporte. A geração eólielétrica *offshore* possibilita a instalação de parques eólicos próximos a grandes centros consumidores de energia, reduzindo significativamente as perdas na transmissão e por consequência os custos do transporte. Numa visão mais ampla e de longo prazo, o desenvolvimento dos projetos eólicos *offshore* proporcionaria condições favoráveis para o desenvolvimento de outros sistemas de infraestrutura de geração elétrica no mar, a exemplo do aproveitamento das ondas (VIRTEBO, 2008).

5 CONCLUSÃO

O ritmo de instalação e a queda dos custos dos projetos eólicos sinalizam que esta será a fonte de energia com maior crescimento nas próximas décadas. A demanda mundial por energia elétrica é crescente, fato que, aliado às pressões socioambientais em torno dos empreendimentos de geração baseados nas fontes convencionais, principalmente as fósseis e a nuclear, contribuem no sentido de busca de fontes renováveis de energia, ambientalmente mais corretas. É neste contexto que a fonte eólica se destaca.

Embora a energia eólica não tenha atingido um nível de custo inferior a energia hidrelétrica, é válido ressaltar que os custos continuam a diminuir cada vez mais. Grandes potências mundiais não deixarão de fazer uso de fontes energéticas que fornecem menores custos, contudo, esses países já fazem uso de forma eficiente da fonte eólica, *onshore* e *offshore*, como medida estratégica para diversificar suas matrizes energéticas, reduzindo a dependência de uma fonte principal, desenvolvendo a indústria e gerando empregos.

Grandes economias mundiais vem investindo forte na geração eolielétrica *offshore*, buscando reduzir impactos ambientais causados por suas principais fontes energéticas, como carvão e nuclear, diversificar sua matriz energética, além de investir num setor que proporciona grandes centros geradores de energia elétrica e gerando empregos.

Esta pesquisa também buscou demonstrar que, no caso brasileiro, apesar da participação da principal fonte de geração elétrica brasileira estar diminuindo em função das pressões socioambientais em torno dos grandes empreendimentos hidrelétricos, é importante que a fonte eólica não seja vista como substituta à fonte hídrica, mas sim complementar, em função da forte complementariedade que existe entre o regime de chuvas e o regime de ventos no Brasil.

A fonte eólica *offshore* é complementar, e não concorrente a versão *onshore*. Apesar do maior custo, geração eolielétrica no mar oferece alguma série de vantagens:

- Não ter limitações em termos de utilização do solo e dos diversos impactos visuais;
- Não há problemas com impactos sonoros, devido à distância da costa;
- Na versão *onshore*, as potências das turbinas são limitadas pelas capacidades dos caminhões, guindastes terrestres, pontes e estradas;

- A superfície do mar tem baixa rugosidade, proporcionando maiores fatores de capacidade;
- Devido à menor rugosidade, as turbinas *offshore* não necessitam de grandes alturas em comparação com as turbinas *onshore*;
- Usinas *offshore* têm maior dispersão, 6 MW/km² contra 13 MW/km² das usinas *onshore*, quando ocorre dispersão, após passar por uma turbina o vento chega mais lento na próxima turbina;
- Globalmente, a turbulência do vento é muito inferior no mar, devido à ausência de barreiras. Assim, as turbinas não sofrem um desgaste exorbitante, tendo um aumento em sua vida útil.
- A possibilidade de instalação de parques eólicos com mais de 150 MW, grande porte, próximos aos grandes centros consumidores de energia. Poucos parques eólicos *onshore* superam 50 MW de capacidade instalada;
- Devido à proximidade dos centros de carga litorâneos, projetos *offshore* promovem linhas de transmissão mais curtas e com tensão mais baixa, diluindo os custos iniciais com as instalações mais dispendiosas.

Os principais pontos de atenção relativos à geração eólielétrica *offshore* são:

- Impacto acústico e eletromagnético sobre a fauna e sobre as telecomunicações;
- Incertezas técnicas referentes às infraestruturas: conexão elétrica, fundações, flutuadores;
- Impactos que a operação e a navegação adicional trarão as comunidades humanas e marinhas próximas ao local de instalação;
- Aspectos jurídicos e institucionais para o licenciamento e a proteção ambiental;
- Aspectos econômicos e jurídicos de modo a compatibilizar a geração eólica *offshore* com atividades militares e econômicas locais, como pesca, navegação, aviação, turismo, mineração, etc. (VIRTEBO, 2008).

REFERÊNCIAS

ABEEOLICA. **Boletim anual de Geração Eólica**. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/pdf/Boletim-Anual-de-Geracao-%20Eolica-2014.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2015.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf)>. Acesso em 16 nov. 2015.

ANEEL. **Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso: 03 dez. 2015.

AWEA. **AWEA U.S. Wind Industry Annual Market Report**. Disponível em: <<http://www.awea.org/Resources/Content.aspx?ItemNumber=875>>. Acesso em: 29 nov. 2015.

BP. **BP Energy Outlook 2035**. Disponível em: <<http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2015/bp-energy-outlook-2035-booklet.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2015.

BWE. *Bundesverband WindEnergie*. **Offshore Wind Energy in Germany 2014: The gigawatt mark has been passed**. Disponível em: <<https://www.wind-energie.de/en/press/press-releases/2015/offshore-wind-energy-germany-2014-gigawatt-mark-has-been-passed>>. Acesso em: 12 nov. 2015.

BWE. *Bundesverband WindEnergie*. Disponível em: <<https://www.wind-energie.de/>>. Acesso em: 19 nov. 2015.

BWEA. **State of the Industry Report 2015**. Disponível em: <<http://www.renewableuk.com/en/publications/reports.cfm/state-of-the-industry-report-2015>>. Acesso em: 02 dez. 2015.

BWP. **Brazil Wind Power 2016: Conference & exhibition**. Disponível em: <<http://www.brazilwindpower.com.br/>>. Acesso em: 03 dez. 2015.

CBEE. **Centro Brasileiro de Energia Eólica - CBEE / UFPE**. 2000. Disponível em: <www.eolica.com.br>. Acesso em: 01 dez. 2015.

CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2015.

CRESESB/CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2015.

DEWI. **Aufstellungszahlen für das erste Halbjahr 2015**. Disponível em: <http://www.dewi.de/dewi_res/fileadmin/pdf/statistics/Infoblatt_2015.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2015.

DEWI. **Deutsches Windenergie Institut**. Disponível em: <<http://www.dewi.de/>>. Acesso em: 17 nov. 2015.

DWG. *Deutsche WindGuard*. **Status of Offshore Wind Energy Development in Germany**. Disponível em: <www.windguard.com>. Acesso em: 13 nov. 2015.

DWIA. **Danish Wind Industry Annual Statistic 2015**. Disponível em: <<http://ipaper.ipapercms.dk/Windpower/Branchestatistik/Branchestatistik2015/>>. Acesso em: 19 nov. 2015.

EERE. **2014 - 2015 Offshore Wind Technologies Market Report**. Disponível em: <<http://energy.gov/sites/prod/files/2015/09/f26/2014-2015-offshore-wind-technologies-market-report-FINAL.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2015.

EÓLICA TECNOLOGIA. Disponível em: <<http://www.eolica.com.br/?s=>>. Acesso em: 29 nov. 2015.

EPE. **Empresa de Pesquisa Energética**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 04 nov. 2015.

EWEA. *The European Wind Energy Association. Offshore Wind in Europe: Walking the tightrope to success*. Disponível em: <<http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/EY-Offshore-Wind-in-Europe.pdf>>. Acesso em: 19 nov. 2015.

EWEA. *The European Wind Energy Association. The European Offshore Wind Industry: key trends and statistics 2014*. Disponível em: <<http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-European-Offshore-Statistics-2014.pdf>>. Acesso em: 19 nov. 2015.

EWEA. *The European Wind Energy Association. Deep Water: The next step for Offshore Wind Energy*. Disponível em: <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Deep_Water.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2015.

Global Tech I. Disponível em: <<http://www.globaltechone.de/en/about/>>. Acesso em: 13 nov. 2015.

GWEC. *Global Wind Energy Council*. Disponível em: <<http://www.gwec.net/>>. Acesso em: 8 out. 2015.

GWEC. *Global Wind Report: Annual Market Update 2014*. Disponível em: <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/03/GWEC_Global_Wind_2014_Report_LR.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2015.

INWEA. *Indian Wind Energy Association*. Disponível em: <<http://www.inwea.org/>>. Acesso em 18 nov. 2015.

MEDEIROS, J. P. C. **Precificação da Energia Eólica Offshore no Brasil**. Disponível em: <http://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/12228/1/JoaoPCM_DISSERT.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2015.

MELO, M. S. M. **Energia Eólica: Aspectos Técnicos e Econômicos**. Rio de Janeiro, 2012. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MME. **Ministério de Minas e Energia: Proinfa**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/>>. Acesso em: 03 dez. 2015.

ORTIZ, G. P.; KAMPEL, M. Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE. **Potencial de Energia Eólica Offshore na Margem do Brasil**. Santos, 2011.

RENEWABLEUK. *Wind Energy in the UK: State of the Industry Report Summary 2015*. Disponível em: <<http://www.renewableuk.com/en/publications/index.cfm/state-of-the-industry-report-2015>>. Acesso em: 11 nov. 2015.

SIEGFRIEDSEN, S.; LEHNHOFF, M.; PREHN, A. *Primary markets for Offshore outside the European Union*. *Wind Engineering*, vol 27, nº 5, 2003. Disponível em: <www.aerodyn.de>. Acesso em: 01 dez. 2015.

VIRTEBO, J. C. **Geração de Energia Elétrica a partir da Fonte Eólica Offshore**. São Paulo, 2008. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

WNA. *World Nuclear Association. Nuclear Power in Germany*. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/Germany/>> Acesso em: 12 nov. 2015.

