

## 1.

### Introdução

A demanda de energia no mundo cresce de forma acelerada, contando na atualidade com um consumo de energia mundial de 546.8 quatrilhões de Btu no ano de 2013, e com uma previsão de crescimento de 56% entre 2010 e 2040 (EIA, 2013). A energia eólica, categorizada dentro do grupo de fontes de energia renováveis, representa uma das alternativas mais favoráveis, pois sua natureza inesgotável, limpa e barata fazem com que ela se torne completamente atraente no atendimento à crescente demanda energética global.

A energia eólica atualmente é uma das fontes de energia renovável de maior crescimento que se tem no mundo e a fonte de geração de energia que mais cresce no Brasil. As cifras revelam que a potência total instalada no final de 2013 no mundo foi de 318,1 GW, com um crescimento de mercado anual acumulado de aproximadamente 12,3% em relação ao ano anterior, que atingiu 283,2 GW em nível mundial (GWEC, 2014). Este crescimento teve uma pequena queda se comparado com os 240 GW que foram instalados no ano 2011 e que proporcionou um crescimento de mercado anual, acumulado aproximadamente 19,2%, passando de 40 GW instalados em 2011 a 94 GW em 2012, evidenciando o vertiginoso desenvolvimento global do mercado de energia eólica (GWEC, 2012b).

O crescimento da energia eólica no mundo é liderado pela China desde que esta assumiu o compromisso de expandir os recursos eólicos do país, com a finalidade de desenvolver a economia rural, além de incrementar a capacidade produtiva e auxiliar e estimular a economia com um crescimento sustentável. As cifras validam o planejamento Chinês, pois até hoje a China é o país com a maior capacidade total instalada para geração de energia eólica no mundo.

Esse pacto político está entrelaçado ao fato de que a China é o país que mais emite gases de efeito estufa, possui 17 das 25 cidades mais poluídas do mundo e conta também com 70% de seus rios, lagos e reservatórios contaminados. Mas o país asiático igualmente investe bilhões em tecnologias verdes, e caminha rapidamente para se tornar o líder do setor, com a meta de ter 20% de sua energia gerada através de fontes renováveis em 2020. Essas metas ousadas de energia renovável estão colocando a China na vanguarda do processo de substituição de fontes fósseis. A fonte eólica continua a crescer muito e, em poucos anos, a distância entre energia eólica e nuclear se ampliará e a energia eólica atingirá a escala das fontes tradicionais.

O esgotamento de fontes tradicionais de energia como a hidráulica e os combustíveis fósseis, além das preocupações com a sustentabilidade, a segurança e a confiabilidade dos sistemas de suprimento de energia, têm causado um intenso crescimento da geração de energia eólica no mundo. Em particular, o Brasil, conta na sua matriz energética com um amplo potencial hidrelétrico e diversas fontes de energia renováveis a serem exploradas, esta matriz apresenta uma configuração renovável-térmica, a qual finalizou o mês de Janeiro de 2015 com uma capacidade eólica instalada de 5,9 GW, o que representa uma participação de 4,4%, como poder ser observada na Figura 1.1. Contudo, a geração de energia eólica tem se apresentado como uma das fontes mais promissoras e competitivas devido a seu vasto potencial eólico tanto em terra (*on-shore*) quanto na costa marítima brasileira (*off-shore*). Uma importante característica deste grande potencial se deve à complementaridade e à estabilidade dos ventos brasileiros com a afluência hidrológica, outorgando uma maior segurança e confiabilidade ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

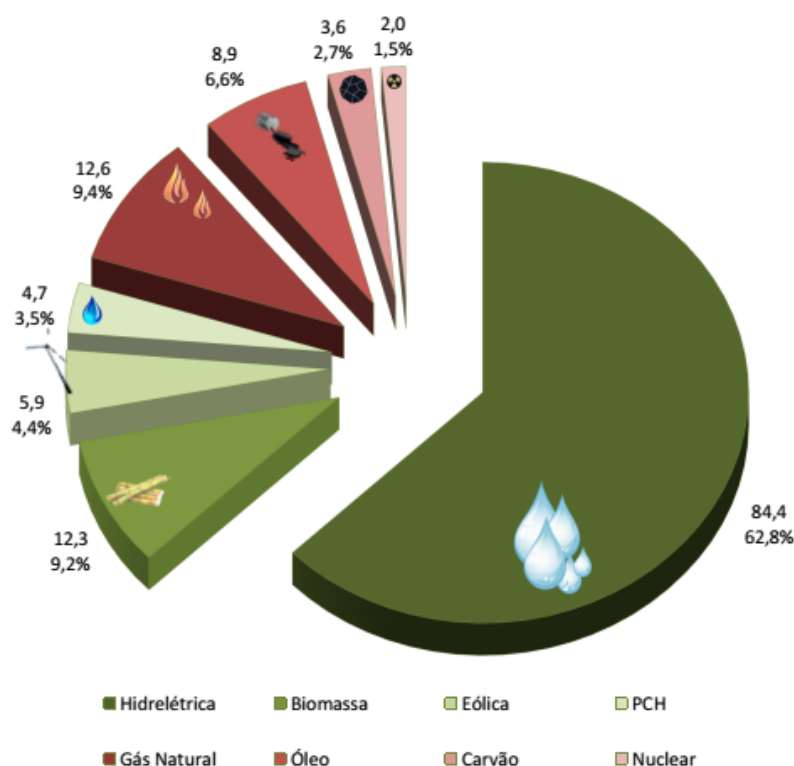


Figura 1.1 – Matriz Elétrica Brasileira para ano 2015. (Fonte: ABEEólica, 2015)

Apesar da água ser considerada um recurso natural, as grandes hidrelétricas também têm fortes impactos ambientais e, dependendo da localização, como áreas de

muita vegetação, podem se tornar grandes emissoras de metano. Os reservatórios em áreas não vegetadas e em rios com poucos sedimentos orgânicos são bem mais neutros que as termelétricas. Não é o caso das usinas da Amazônia que, mesmo sem grandes reservatórios, retêm água de rios sedimentosos e alagam áreas com grande quantidade de vegetação e matéria orgânica.

A geração de energia elétrica por meio de turbinas eólicas constitui uma alternativa para diversos níveis de demanda. As pequenas centrais podem suprir pequenas localidades distantes da rede, contribuindo para o processo de universalização do atendimento. Quanto às centrais de grande porte, estas têm potencial para atender uma significativa parcela do SIN com importantes ganhos: contribuindo para a redução da emissão, pelas usinas térmicas, de poluentes atmosféricos; diminuindo a necessidade da construção de grandes reservatórios; e reduzindo o risco gerado pela sazonalidade hidrológica, à luz da complementaridade (ANEEL, 2005). A Figura 1.2 mostra complementaridade da energia eólica e a energia hidroelétrica.

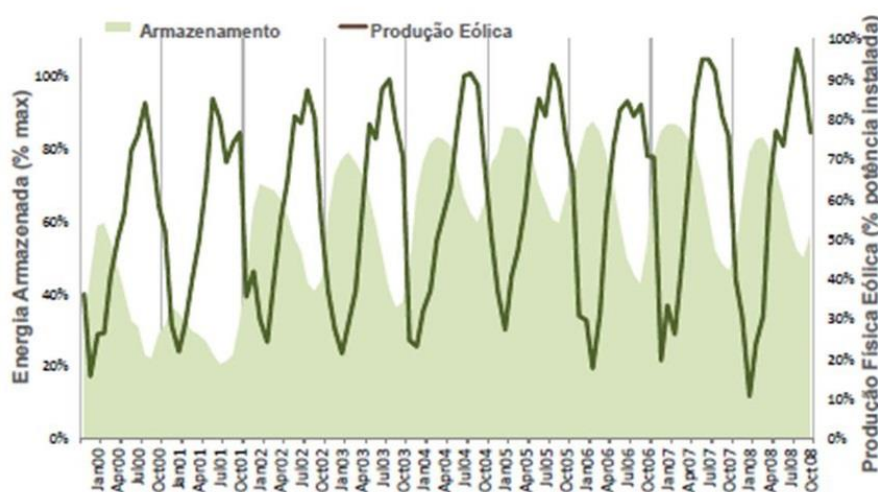


Figura 1.2 – Complementaridade entre Geração Hidroelétrica e Eólica.

(Fonte: BNDES, 2012)

Historicamente, o Brasil depende fortemente de seus recursos hídricos para geração de energia e usinas térmicas (a gás) para fins de confiabilidade do sistema. Há um reconhecimento crescente de que o uso desses recursos está aumentando devido à expansão econômica e ao crescimento populacional. Devido à alta dependência da geração de energia hidroelétrica, o Brasil enfrentou uma escassez de energia em 2001, a qual afetou fortemente a economia do país. Com a finalidade de remediar a situação e

evitar crises de energia mais graves no futuro, o Governo do Brasil lançou programas de incentivos para geração de energias renováveis. Foi assim que no ano 2002, o governo Brasileiro aprovou um programa chamado PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), para estimular a geração de energia por biomassa, energia eólica e pequenas hidrelétricas. Este programa foi convertido na Lei Nº 10.438 e revisado em Novembro de 2003, e nele se estabeleceu aumentar a participação das três fontes renováveis para 10% do consumo anual de eletricidade em 20 anos, dos quais 100 MW devem ser provenientes da geração de energia eólica.

O Brasil se encontra em uma posição privilegiada na lista de países com maior potencial de produção de energia eólica, ao contar com grandes áreas de terras despovoadas, excelentes recursos naturais e um litoral de 9.650 km de extensão. Os melhores recursos eólicos comprovados se localizam na região do Norte / Nordeste do Brasil e, em particular, nos estados de Rio Grande do Norte, Ceará, Pernambuco e Bahia. No Sul/Sudeste também existem bons recursos eólicos, especialmente nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (GWEC, 2012b). Tudo isso faz com que o interesse do Brasil em desenvolver novas fontes de energia renováveis seja crescente. Interesse que é impulsionado pelas preocupações sobre a segurança energética, na resistência em confiar em combustíveis fósseis importados, mas também porque a excelente complementaridade sazonal da energia eólica com energia hidrelétrica está ganhando aceitação.

Ainda que o Brasil possua esta grande quantidade de recursos eólicos, o país é impulsionado principalmente pela energia hídrica, e sofre cada vez mais com as flutuações sazonais e os períodos de escassez de água. A geração de energia eólica está ganhando cada vez maior participação e pode ajudar a aliviar algumas das preocupações sérias de segurança energética, especialmente durante os invernos secos; porque além das variações sazonais, as novas usinas hidrelétricas que estão atualmente em construção, terão pouquíssimo armazenamento de água devido às questões ambientais. Isso faz com que o sistema elétrico brasileiro se torne mais vulnerável às variabilidades climatológicas (GWEC, 2011).

## 1.1.

### **Energia Eólica em Cifras**

O crescimento da energia eólica no mundo tem sido impulsionado principalmente pelo desenvolvimento contínuo da China, que se tornou o país com maior capacidade de energia eólica instalada no mundo. O esforço constante da China na instalação de energia eólica revela que além de superar e liderar o mercado, hoje no país a energia eólica supera

a produção de energia nuclear em 2%, produzindo uma enorme quantidade de energia: ao redor de 100 TWh de eletricidade (Ecopolitica, 2013).

Segundo o Global Wind Energy Council (GWEC, 2013), o Continente Europeu lidera a geração de energia eólica com 121.474 MW instalados até o final de 2013, Ásia com 115.927 MW é o segundo continente que segue bem de perto a Europa. O terceiro continente é América do Norte (constituído por EUA, Canadá e México) com 70.811 MW. Posteriormente está América Latina e o Caribe com 4.764 MW. Muito perto está a Região Pacífica cuja potência instalada vem principalmente da Austrália com um total de 3.874 MW e finalmente, na sexta posição está África e Oriente Médio com 1.255 MW até o final de 2013. A Figura 1.3 mostra os primeiros 10 países que lideram a produção de energia eólica no mundo. Destacando-se dentro deste grupo China como o maior gerador com 91.412 MW, seguido de EUA e Alemanha com 61.091 MW e 34.250 MW, respectivamente. De forma similar, as Figuras 1.4 e 1.5 apresentam as capacidades acumuladas e instaladas da energia eólica no mundo, enquanto que o crescimento que este mercado vem apresentando é representado pela Figura 1.6 como é indicado pelo World Wind Energy Association (WWEA).

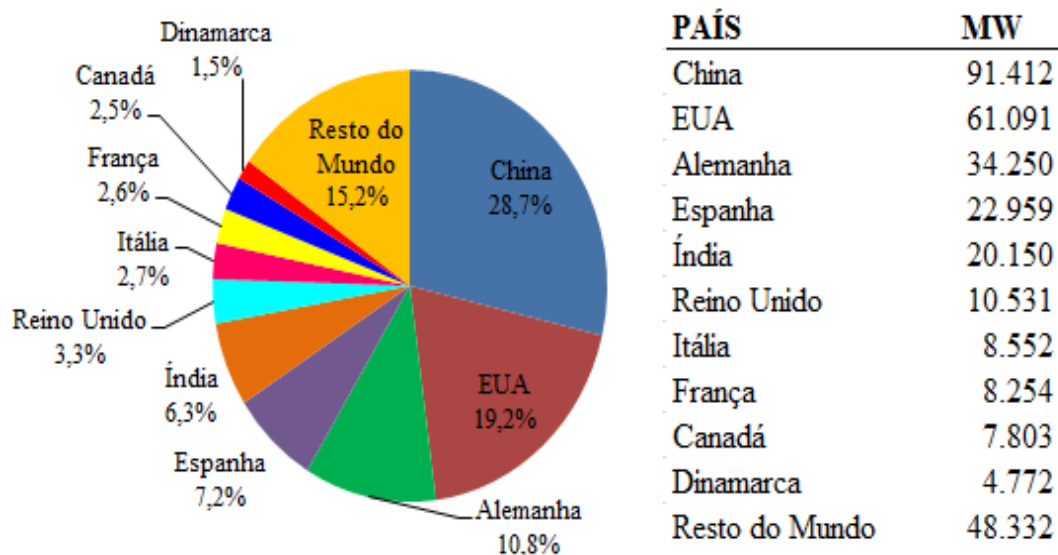


Figura 1.3 – Principais Países geradores de energia eólica no mundo.

(Fonte: GWEC, 2013)

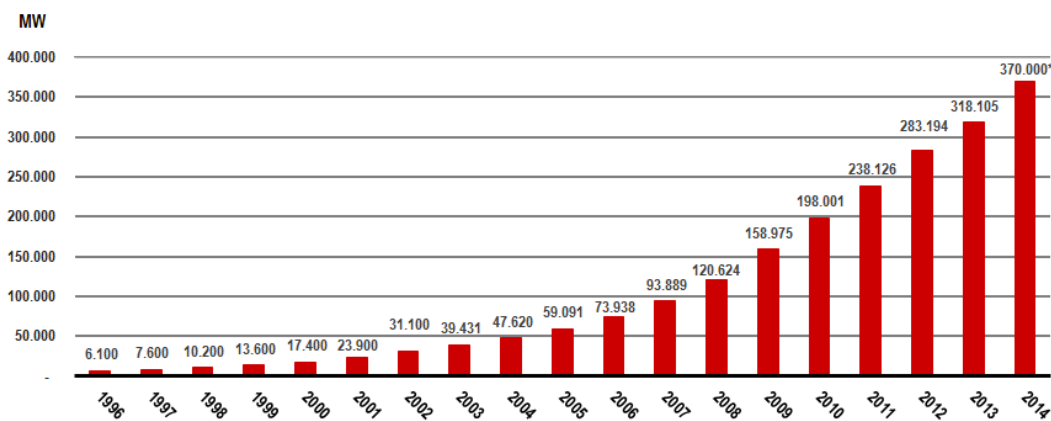


Figura 1.4 – Capacidade total acumulada instalada de energia eólica no mundo (MW).

(Fonte: GWEC, 2013; WWEA, 2015. Adapta pelo autor).

\*Total de capacidade instalada inclui todas as capacidades conectadas e não conectadas à rede.

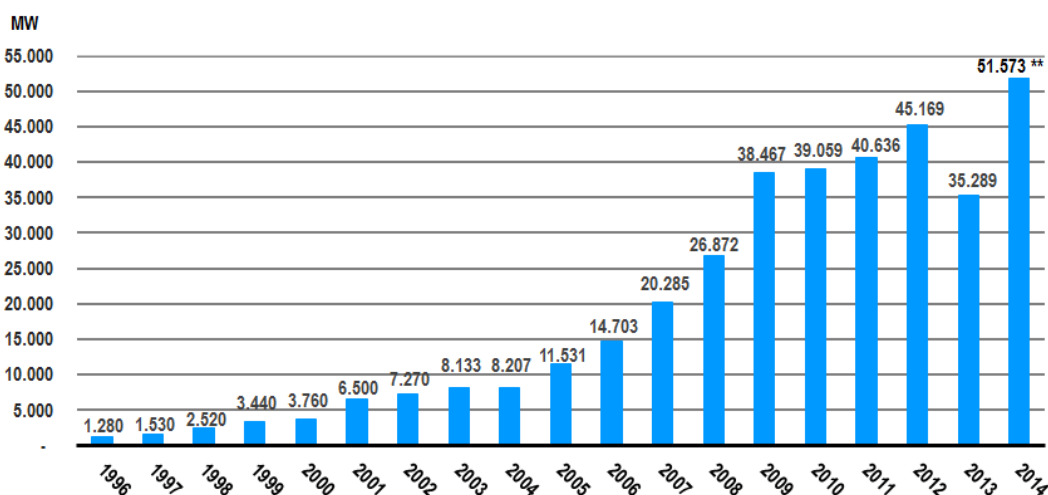


Figura 1.5 – Nova capacidade instalada de energia eólica no mundo (MW). (Fonte:

GWEC, 2013; WWEA, 2015. Adapta pelo autor).

\*\*Inclui a capacidade líquida adicionada durante o ano de 2014.

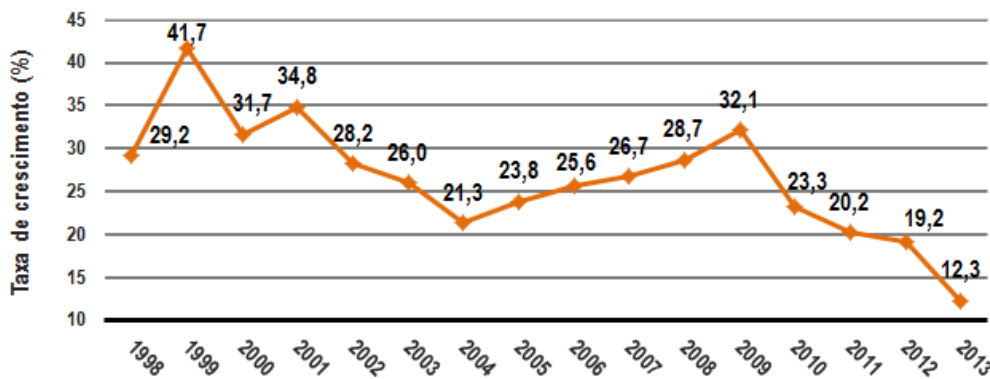


Figura 1.6 – Taxa de crescimento eólico mundial (%).

(Fonte: WWEA, 2012. Adapta pelo autor)

Um atlas de vento do Brasil, publicado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, mostra que o potencial de energia eólica em terra é de 143 GW a 50 metros de altura (ver Figura 1.7) (Amarante et al., 2001). Em 2008 e 2009, novas medições realizadas em vários estados a 80-100 metros, indicam que o potencial real é consideravelmente maior. Provavelmente mais de 350 GW.

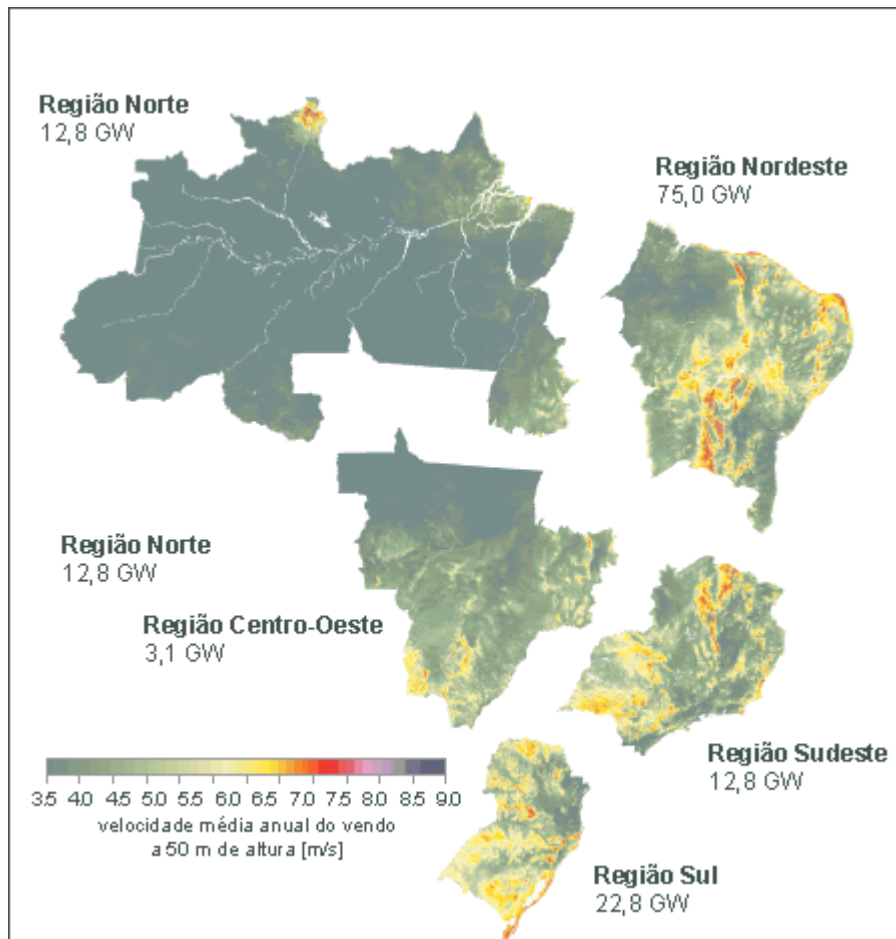


Figura 1.7 – Atlas do potencial eólico brasileiro. (Fonte: Amarante et al., 2001)

Entre os anos 1999 e 2005, a capacidade de energia eólica instalada no Brasil incrementou-se minimamente. A partir do ano 2006, esta teve aumentos significativos contando com 208 MW instalados especificamente para esse ano, para um total de 237 MW no final do período. Apesar do significativo aumento, no ano 2007 a capacidade cresceu só em 10,2 MW, elevando a capacidade total em 247 MW. Similarmente, a capacidade total instalada para o ano 2008 teve um crescimento de 38,1%, o que equivale a 341 MW. Em 2009, o mercado eólico brasileiro cresceu em 264 MW, elevando a capacidade total instalada em um total de 606 MW. No mês de março de 2010

este número chegou a 709 MW, pelo que a capacidade de geração total de energia elétrica no Brasil atingiu 107,5 GW, dos quais 74% vieram de fontes renováveis, principalmente de grandes usinas hidrelétricas. Contudo, no consolidado do ano 2010, o mercado eólico brasileiro cresceu em 326 MW, elevando a capacidade total instalada em um total de 931 MW (para maiores detalhes ver a Tabela 1.1), tendo assim, um crescimento de 54,2% em termos da capacidade total instalada, e um aumento de 23,8% em termos de adições de capacidade anuais. Assim mesmo, o setor eólico brasileiro instalou 583 MW em 2011, elevando a capacidade total instalada em 1.509 MW, um aumento de 63% (da capacidade instalada) e um aumento de 56% em termos de crescimento anual do mercado. O Brasil atingiu mais de 1.000 MW em junho de 2011 e tem mais de 7.000 MW em preparação para ser concluído em 2016 (GWEC, 2012b).

Em 2012, 40 novos parques eólicos entraram em funcionamento, adicionando mais de 1.000 MW de nova capacidade para a rede elétrica brasileira e a criação de 15 mil novos postos de trabalho, para o final de 2012 o Brasil tinha 2.508 MW de capacidade de energia eólica instalada, contando com 84 parques eólicos em operação, distribuídos principalmente pelas regiões nordeste (65% da capacidade instalada), e sul (35% da capacidade instalada), energia suficiente para quatro milhões de famílias e representando 2% do consumo nacional de eletricidade (GWEC, 2012b).

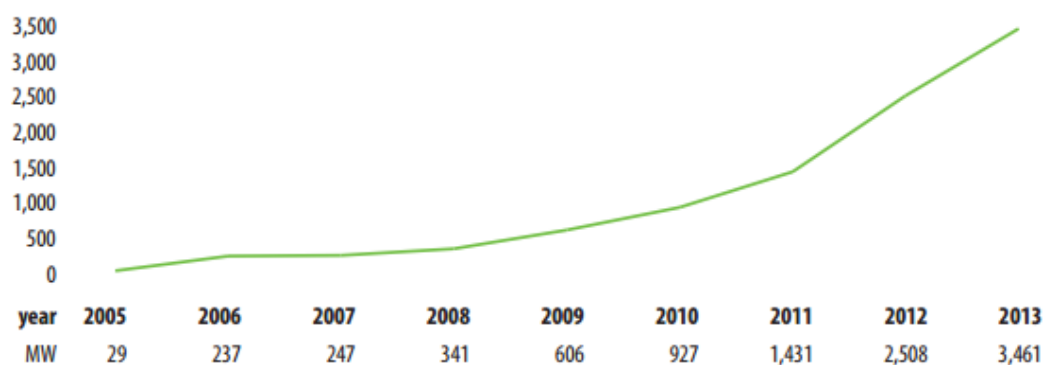


Figura 1.8 – Capacidade total instala no Brasil. (Fonte: GWEC, 2013)

No final de 2013, o Brasil tinha 3.461 MW de capacidade eólica instalada, o suficiente para abastecer oito milhões de famílias, os quais que representam 3% do consumo nacional de energia elétrica. Só em 2013, 34 novos parques eólicos entraram em operação, adicionando 953 MW de nova capacidade para a rede elétrica brasileira. A indústria eólica e sua cadeia de abastecimento estão ficando firmemente estabelecida no Brasil, e nove fabricantes internacionais abriram instalações no país. Quase metade da



nova capacidade instalada em 2013 veio de três novos complexos de parques eólicos: 160 MW do complexo de Asa Branca constituído por cinco parques eólicos, 150 MW do complexo de Calango que também se espalhou ao longo de cinco parques eólicos e 120 MW do complexo Renascença composta de quatro parques eólicos (GWEC, 2013).

Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), a fonte de energia que mais cresce no país é a eólica, passando de serem instalados 27,1 MW em 2005 para 5.610 MW em Outubro de 2014 (ABEEólica, 2014). É importante destacar que este aumento se deu principalmente pelo interesse do governo federal na diversificação da matriz elétrica nacional, depois da crise energética de 2001, além de serem lançados novos Leilões de Energia Eólica com a finalidade de aumentar a atratividade econômica do setor. Com esse aumento, a previsão é de que em 2016, a energia eólica seja responsável por 5,5% da matriz elétrica do país. Na Figura 1.9 é apresentada a projeção anual a ser instalada até 2018.

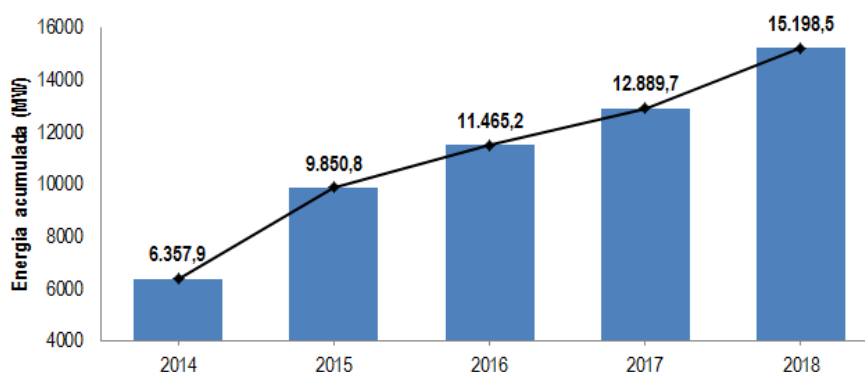


Figura 1.9 – Capacidade de energia eólica instalada projetada no Brasil. (Fonte: ABEEólica, 2014. Adaptada pelo autor)

No Plano Decenal de Expansão de Energia 2021 do governo brasileiro (PDE 2021) estabeleceu-se uma meta de 15,6 GW de capacidade eólica instalada a ser alcançada até 2021, sendo responsável por 9% da geração nacional de eletricidade (EPE, 2012). No entanto, novas metas foram marcadas no Plano Decenal de Energia do governo brasileiro (PDE 2022), no qual se estabeleceu uma meta de 17 GW de capacidade eólica instalada a serem alcançados até 2022, representando assim o 9,5% do consumo nacional de energia elétrica. (GWEC, 2013)

Os investimentos em capacidade instalada no mercado Brasileiro vêm aumentando ano após ano, assim o confirma a Tabela 1.2, a qual contém os valores dos contratos

firmados até janeiro de 2013. Como o crescimento econômico do Brasil continua, e a demanda de eletricidade aumenta cada vez mais, há uma crescente necessidade de maiores investimentos em energias renováveis como a eólica, fazendo com que a geração deste tipo de energia se torne em uma fonte cada vez mais atraente para o Brasil. Este aspecto é reforçado pelas avaliações feitas pelo Global Wind Energy Council, organismo internacional que reúne entidades e empresas relacionadas à produção desse tipo de energia, e que estabeleceu que o Brasil é o país mais promissor do mundo em termos de produção de energia eólica (GWEC, 2012b).

Tabela 1.1 – Potência em operação em 31/12/2010 e potência esperada para o ano 2013.

ESTADOS	MW em Operação	MW Futuros
	2010	2013
<b>Bahía</b>	-	977,0
<b>Ceará</b>	502,2	629,0
<b>Paraíba</b>	61,8	5,4
<b>Paraná</b>	2,5	-
<b>Pernambuco</b>	25,2	-
<b>Piauí</b>	18,0	-
<b>Rio de Janeiro</b>	28,1	135,0
<b>Rio Grande do Norte</b>	102,1	1.842,0
<b>Rio Grande do Sul</b>	158,0	502,0
<b>Santa Catarina</b>	14,4	217,7
<b>Sergipe</b>	-	30,0
<b>Total</b>	<b>931,0</b>	<b>4.401,1</b>

Fonte: GWEC, 2012b

Ao final de 2012, o país ocupava o 20º lugar no mundo em capacidade instalada de geração de energia. De 2005 a 2012, a capacidade instalada aumentou 70 vezes e foi a que mais cresceu dentre todas as fontes de energia. Apesar do forte crescimento, a capacidade instalada brasileira representa apenas 0,6% da capacidade mundial. No meio do ano de 2014, o Brasil alcançou a 13ª posição no ranking mundial de produção de energia eólica com 4,7 GW instaladas, para o final de Novembro o país atingiu de 5,66 GW de capacidade instalada ultrapassando a Dinamarca e entrando assim na lista dos 10 primeiros países geradores de energia eólica. Destaca-se também que o Brasil tornou-se o

terceiro maior mercado de novas turbinas eólicas no ranking liderado pelos EUA e a Índia (WWEA, 2014).

Tabela 1.2 – Investimento e capacidade no Brasil.

ANO	Capacidade Instalada (MW)	Dólares \$ (Milhões)
2010	325,6	558,63
2011	498,0	855,61
2012	1.124,0	1.928,43
2013	2.770,1	4.752,62
2014	2.256,3	3.871,10
2015	28,8	49,41
2016	861,3	1.477,72
2017	281,8	483,48

Fonte: GWEC, 2012b

Com a contratação de novos Leilões de Energia no mercado Brasileiro de fontes renováveis de energia (ver Tabela 1.3 e Figura 1.10), a fonte eólica vem-se destacando fortemente nos últimos dez anos, principalmente em termos de evolução tecnológica e custos de produção; gerando assim uma redução dos preços de energia eólica, devido ao processo competitivo dos leilões para a contratação da fonte em contratos de vinte anos, somada a uma redução nos custos de produção, em virtude dos ganhos tecnológicos e de produtividade, o que permite que o Brasil esteja hoje posicionado no ranking dos 10 maiores países geradores de energia eólica.

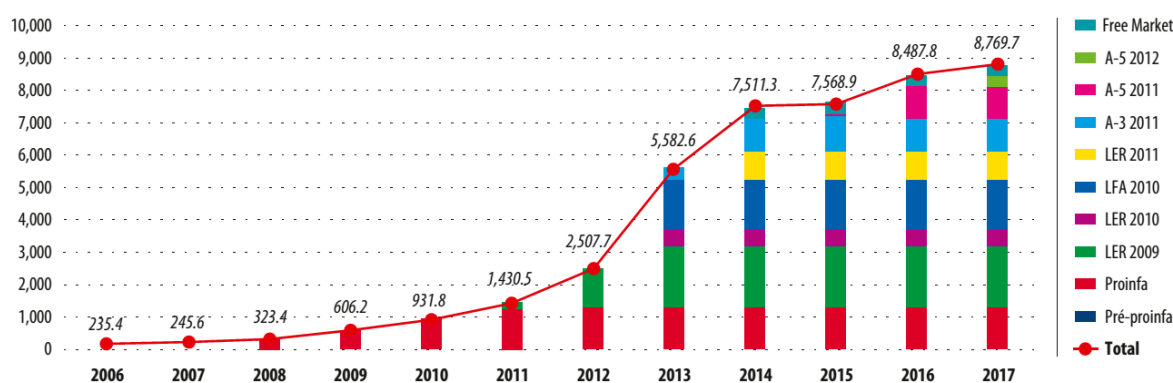


Figura 1.10 – Capacidade instalada contratada em Leilões no Brasil.

(Fonte: GWEC, 2012b)

Tabela 1.3 – Evolução da Energia Eólica nos Leilões.

<b>LEILÃO</b>	<b>Potência (MW)</b>	<b>Nº de Parques</b>
PROINFA	1.303,7	53
LER 2009	1.904,8	71
LER 2010	545,2	20
LFA 2010	1.521,4	50
LER 2011	862,0	34
A-3 2011	1.055,0	44
A-5 2011	1.014,8	41
A-5 2012	249,6	9
LER 2013	1.503,5	66
A-3 2013	867,6	39
A-5 Dez/2013	2.332,8	97
A-3 2014	551,0	21
LER 2014	769,1	31
ACL	717,8	36

Fonte: ABBEEólica, 2014.

Na próxima Seção e nas seções subsequentes, apresenta-se uma análise do estado da arte da previsão de energia eólica ou da previsão do vento usado para a obtenção da geração eólica futura baseada na relação direta existente entre a velocidade e a potência. Além disso, detalham-se alguns conceitos relacionados à previsão da produção eólica.

## 1.2.

### Motivação

A geração eólica depende da velocidade do vento, um recurso renovável e abundante, porém uma variável aleatória. Em função do comportamento estocástico do vento é realizada a previsão da produção eólica, informação importante para uma integração segura e econômica de parques eólicos ao sistema elétrico. A operação dos sistemas elétricos baseia-se não só na previsão da velocidade do vento, como também na geração eólica em horizontes de curto prazo, por exemplo, até 24 horas à frente em bases horárias. Em este processo se requer que tais previsões sejam as menos imprecisas possíveis, já que elas afetam de forma direta o planejamento das atividades de operação

tais como: regulação, atendimento da carga, balanceamento e programação do despacho das unidades geradoras entre outras.

Com a necessidade de maior precisão no processo de previsão, as previsões probabilísticas da geração de energia eólica têm adquirido maior relevância e participação na última década, pois elas fornecem melhores resultados a través da densidade de probabilidade, minimizando os riscos técnicos e financeiros. Por conseguinte, tem-se incursionado em diversas técnicas e metodologias que incluem a incerteza no cálculo das previsões podendo assim se beneficiar da disponibilidade das estimativas da distribuição de probabilidade de geração de energia eólica, pois tais estimações permitem obter previsões da densidade de probabilidade para a energia eólica. Apesar dos avanços no desenvolvimento de técnicas para previsão probabilística, a quantidade de métodos para previsão da densidade da energia eólica é muito menor se comparado com os métodos e estudos feitos para previsão pontual.

As informações fornecidas pelos algoritmos de previsão probabilística criam valor adicional (por exemplo, econômico) em vários problemas de tomada de decisão (Bessa et al., 2011). Em Botterud et al. (2010) apresentou-se várias estratégias de oferta para a energia eólica no mercado da eletricidade, tais como maximização da utilidade esperada e o "trade-off" entre o valor esperado e o risco. Em Botterud et al. (2011a), o despacho das unidades geradoras e os requerimentos de reserva operacionais são determinados através do uso da previsão probabilística, contribuindo para melhorar o desempenho do sistema em termos de custo e confiabilidade. De forma similar, Matos & Bessa (2011) apresentaram uma abordagem para tomada de decisão para definir os requisitos de reservas operacionais usando previsões probabilísticas não paramétricas (um conjunto de quantis) como entrada. Por sua vez, em Botterud et al. (2013), é analisado como o despacho da demanda é combinado com previsões probabilísticas de energia eólica para acomodar uma grande proporção da energia eólica nas operações do mercado de energia eletricidade. Para isto é modelado um dia à frente e o mercado spot de eletricidade considerando o despacho centralizado das unidades geradoras. Uma análise muito mais detalhada dos métodos e técnicas para a representação de incertezas e o problema das unidades geradoras encontra-se em Botterud et al. (2011b).

A previsão probabilística consiste em expressar a geração de energia eólica ou erro de previsão em "termos probabilísticos", tais como: representação paramétrica (por exemplo, distribuição Gaussiana); momentos das distribuições (por exemplo, desvio padrão, assimetria), um conjunto de quantis; função densidade de probabilidade (fdp). A representação da incerteza é determinada pelo algoritmo escolhido, os métodos mais utilizados são a Regressão Quantílica e a Estimação da Densidade por *kernel*, no entanto, outros modelos também podem ser usados como é indicado posteriormente.

Quando a Regressão Quantílica é utilizada, a incerteza é representada por um conjunto de quantis (Bremnes, 2004; Nielsen et al., 2006; Bremnes, 2006; Juban et al., 2007a; Møller et al., 2008; Botterud et al., 2010; Bessa et al., 2011a, 2011b; Pritchard, 2011; Wang et al., 2011; Bessa et al., 2012a; Liu et al., 2012a; Anastasiades & McSharry, 2013; Jónsson et al., 2013).

No caso da Densidade por *kernel*, que a diferença da Regressão Quantílica é uma metodologia não paramétrica, esta permite obter previsões probabilísticas de modelos cuja saída é uma pdf da energia eólica prevista (Juban et al., 2007b; Botterud et al., 2011a; Bessa et al., 2011a, 2011b; Botterud et al., 2013; Bessa et al., 2012a, 2012b; Jeon & Taylor, 2012; Zhou et al., 2103).

Em Carpinone et al. (2010), os autores propõem uma estratégia diferente das duas anteriores, a qual é baseada no uso de modelos de Cadeia de Markov em Tempo Discreto, desenvolvida a partir das análises das séries temporais de energia eólica, permitindo obter diretamente, estimativas das distribuições de energia eólica em um horizonte de curtíssimo prazo, sem a necessidade de hipóteses restritivas sobre a distribuição de probabilidade da geração de energia eólica.

Por sua vez, o algoritmo SBL (*Sparse Bayesian Learning*, pelas suas siglas em inglês) introduzido por Yang et al. (2012), fornece resultados da previsão da distribuição da geração de energia eólica através da estimação da função de densidade de probabilidade dos pesos das funções dos *kernel*. Para melhorar a precisão das previsões, a série temporal da geração eólica é decomposta em várias outras séries temporais previsíveis fazendo uso da Transformada Discreta de Wavelet, que depois são previstas usando o algoritmo SBL.

Uma abordagem diferente para determinar a previsão da densidade de probabilidade da velocidade e da direção do vento de modelos de séries temporais é substituindo estes valores por previsões conjuntas (também conhecidas como "*Ensemble Forecasts*") de um modelo NWP (*Numerical Weather Prediction*) no contexto de energia eólica (Taylor et al., 2009; Pinson & Madsen, 2009; Pinson et al., 2009b; Sloughter et al., 2010; Thorarinsdottir & Gneiting, 2010 e Al-Yahyai et al., 2012). Usar a densidade de previsão de um modelo de séries temporais tem vantagens em termos de custo, pois esta abordagem proporciona previsões probabilísticas e permite a comparação das previsões com previsões pontuais no curto prazo.

Em Zhang et al. (2014) apresenta-se um modelo estatístico para formular a distribuição condicional do erro de previsão para vários parques eólicos usando a Teoria de Cópulas, com o propósito de modelar a dependência estocástica entre a potência prevista e produção real ao invés de modelar a dependência entre a velocidade do vento prevista e produção de energia real como é feito em Bessa et al. (2011b). Outra

abordagem que usa Análise Espectral Singular para gerar previsões de energia eólica probabilísticas é proposta por Qadrdan et al. (2013), com a finalidade de usar os resultados em uma programação estocástica para o problema de despacho de unidades geradoras.

Uma técnica recente proposta por Kou et al. (2013) é a *Sparse Bayesian Model*, a qual se baseia no *Warped Gaussian Process* (WGP), que permite lidar com as incertezas não-gaussianas na série de potência eólica transformando-a automaticamente a uma série latente. Similarmente, em Kou et al (2014) apresenta-se um modelo *ensemble* para a previsão probabilística da geração de energia eólica combinando *online model selection* para escolher dinamicamente o modelo base mais provável e WGP.

Este trabalho adotará a previsão probabilística como o eixo de desenvolvimento desta pesquisa, visto que a extensão da previsão pontual para a previsão probabilística permite uma gestão mais eficiente dos sistemas de transmissão através de melhores programações e melhores despachos de carga. A análise probabilística da incerteza da geração de energia eólica também traz importantes benefícios operacionais e econômicos ao permitir um gerenciamento mais eficiente da energia eólica, resultando em uma redução da dependência de geração de energia a partir de combustíveis fósseis.

### 1.3.

#### **Objetivo do Trabalho**

Este trabalho tem como objetivo investigar e propor uma metodologia para previsão probabilística da geração de energia eólica de curto prazo, isto é, ao invés de propor um modelo para a previsão da realização de um processo estocástico da velocidade do vento; e subsequentemente, utilizar a curva de potência fornecida pelo fabricante. A abordagem proposta nesta tese produzirá a previsão da distribuição de probabilidade do processo gerador da série de geração eólica através do levantamento estocástico da curva de potência. Por meio desta previsão probabilística é possível obter previsões pontuais e por intervalo para diferentes níveis de confiança que prescindem de uma premissa paramétrica para a densidade da geração de energia eólica e também permite o cálculo de medidas de risco.

A geração eólica guarda uma relação não linear com a velocidade do vento e ambas têm uma densidade conjunta, a partir da qual pode ser derivada uma densidade condicional da geração para uma dada velocidade do vento não conhecida (Ver mais detalhes em Juban et al 2007b; Botterud et al., 2011b; Bessa et al., 2012a; Jeon & Taylor, 2012). Assim é possível prever a distribuição da probabilidade da potência para uma dada

previsão da velocidade do vento. A previsão da velocidade do vento pode ser obtida através do uso de modelos estatísticos de análise de séries temporais. Combinando a previsão pontual da velocidade do vento com a densidade condicional da geração de energia eólica, é possível obter um melhor prognóstico da densidade de probabilidade incondicional da geração eólica em determinado instante do tempo no futuro. Visando uma metodologia completamente não paramétrica, propõe-se o emprego da Análise Espectral Singular, SSA (*Singular Spectrum Analysis* – pelas suas siglas em inglês) para a previsão da velocidade do vento em conjunto com a Densidade Condicional por *kernel* como uma estimativa estocástica da curva de potência; seguindo assim o tratamento tradicional em dois estágios para a previsão da geração de eólica.

Desta forma o escopo geral desta tese é formular uma estratégia de especificação estatística não paramétrica para previsão probabilística da geração de energia eólica.

#### 1.4.

### Organização da Tese

Este documento está organizado em sete capítulos, incluindo este Capítulo de Introdução, no qual é abordada a evolução da energia eólica em termos de potência gerada tanto no mundo quanto no Brasil. Assim mesmo, é estabelecida a motivação deste trabalho e o objetivo.

Seguidamente no Capítulo 2 é descrito o processo de geração da energia eólica, a origem, o processo de conversão e a forma em que é relacionada da velocidade do vento com a geração. Subsequentemente são definidas as características mais relevantes da velocidade do vento e o tipo de distribuições associadas.

No Capítulo 3 é feita uma revisão do estado da arte da previsão de curto prazo tanto da velocidade do vento quanto da produção de energia eólica. Além disso, é exposta a diferença entre a previsão pontual e a previsão probabilística destacando as vantagens que possui a previsão probabilística. Também são definidos os diferentes enfoques de modelagem para a previsão da velocidade do vento.

O marco teórico está constituído pelos Capítulos 4 e 5 respectivamente. No Capítulo 4 é descrita detalhadamente a abordagem da Análise Espectral Singular (SSA) para previsão de séries temporais. No Capítulo 5 são apresentados os métodos mais usados para a obtenção da previsão probabilística da geração de energia eólica, com especial ênfase no estimador de Naradaya-Watson para o cálculo da densidade condicional por *kernel*.



A estratégia de especificação metodológica proposta é descrita no Capítulo 6. Nele é pormenorizado o arcabouço metodológico não paramétrico para a previsão probabilística da geração de energia eólica proposta, onde os resultados da aplicação desta modelagem são apresentados no Capítulo 7.

No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões sobre os resultados obtidos da aplicação da metodologia proposta, as considerações finais e as perspectivas de continuação da pesquisa.

Por último, o Capítulo 9 contem as referências bibliográficas que foram utilizadas e, posterior a isto, estão finalmente os Apêndices do trabalho.