

1

Introdução

A demanda energética tem sido um dos assuntos mais discutidos no mundo, uma vez que ela tem grande importância na vida da humanidade.

A crescente demanda energética no mundo se dá em razão da melhoria dos padrões de vida nos países em desenvolvimento, de uma forma que traz a preocupação com alguns aspectos essenciais para a política e planejamento energético de todas as economias emergentes. Dentre eles pode-se citar a segurança no suprimento de energia necessária para o desenvolvimento social e econômico de um país e os custos ambientais para atender a esse aumento no consumo de energia (Goldemberg & Villanueva, 2003).

A inserção de recursos complementares na matriz energética, com alocação das fontes renováveis, deve minimizar os impactos causados por crises internacionais que afetam o mercado de combustíveis fósseis ou por instabilidade hidrelétrica na época de estiagem (Martins et al, 2008).

Com base nos fatos expostos acima, nota-se que as pesquisas sobre a produção e a demanda de energia vêm recebendo grande incentivo em todo mundo, principalmente após o último relatório de Painel Inter-Governamental para mudanças Climáticas (IPCC). Nessa conferência também foram discutidos problemas ambientais tais como o efeito estufa (Martins et al, 2008).

Os combustíveis fósseis são os maiores responsáveis pela produção de gases causadores do efeito estufa, além de não possuírem reservas permanentes. A dependência em relação a estes combustíveis ameaça os ecossistemas do planeta e deixa a humanidade em situação desconfortável em relação à oferta de energia para o futuro.

A geração nuclear de energia elimina o problema das emissões de gases na atmosfera. No entanto, apesar das contribuições desse tipo de energia, há resíduos nucleares, que sem uma solução até hoje encontrada, representam uma terrível herança deixada através dos séculos às futuras gerações.

A necessidade de substituição das energias convencionais tornou-se evidente quando aconteceram os dois grandes choques de petróleo na década 70, os preços dispararam de tal forma que não havia controle dos preços no mercado, e a maior consequência foi a queda do nível da atividade econômica provocada pela recessão mundial.

Com a crise de petróleo, as fontes de energia renováveis voltaram a ser exploradas, como, por exemplo, o vento que foi usado para locomoção dos barcos a vela e, a construção dos moinhos para irrigar as terras áridas.

As energias renováveis são aquelas obtidas de fontes naturais capazes de regenerar e são consideradas inesgotáveis. Surgiram como forma de reduzir a dependência em relação às fontes de energia convencionais, a fim de garantir a segurança energética, renovar as matrizes energéticas e preservar o meio ambiente, que ao longo dos séculos tem sofrido inúmeros desgastes. Essas energias são: hídrica, biomassa, solar e eólica dentre outras.

1.1 Introdução

As diferentes formas de energia existentes são produzidas e consumidas de formas diferenciadas, de acordo com os continentes e regiões geográficas. No gráfico da Figura 1 e na Tabela 1 pode-se verificar que os combustíveis fósseis continuam a dominar a produção energética nos países de Organização Econômica para Cooperação e Desenvolvimento (OECD). Esses países são os maiores consumidores de combustíveis fósseis no mundo. Em relação a Figura 1 ainda pode-se salientar de que nos anos 2007 e 2008 o consumo de combustíveis fósseis foi praticamente igual, já em 2009 houve uma ligeira queda em relação aos dois anos anteriores, se tornando um dos reflexos da recente crise econômica mundial que provocou a recessão nas economias dos países desenvolvidos.

No que tange às energias renováveis, o consumo é pouco expressivo com relação aos combustíveis convencionais.

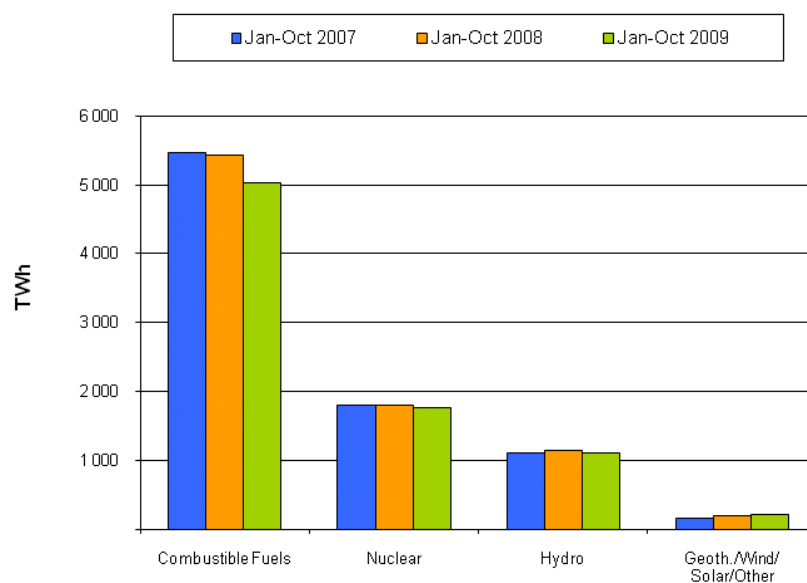


Figura 1-Comparação da produção de energia nos países da OECD.

Fonte: IEA outubro de 2009

Tabela 1-Consumo de energia nos países da OECD.

	Jan-Out/ 2009	Variações	Jan-Out/2008
Combustíveis Fósseis	5.037,6	-7,3%	6.491
Nuclear	1.766,0	-1,7%	2.171
Hidrelétrica	1.108,0	-2,4%	1.349
Geotérmica/Eólica/Solar/outros	221,4	16,9%	232
Produção Total	8.133,1	-4,9%	10.243
Importações	308,8	-8,2%	401
Exportações	299,0	-8,6%	390
Provisão de Energia	8.142,9	-4,9%	10.254

Fonte: IEA Outubro de 2009

1.1.2 Panorama da Energia Eólica no Mundo

A energia eólica é vista como uma das mais promissoras fontes de energia renováveis, caracterizada por uma tecnologia madura. As turbinas eólicas, isoladas ou em pequenos grupos de quatro ou cinco, e, cada vez mais, em parques eólicos com quarenta ou cinquenta unidades, são já um elemento habitual da paisagem de muitos países europeus, nomeadamente a Alemanha, Dinamarca, Holanda e, mais recentemente, o Reino Unido e a Espanha. Nos EUA, a energia eólica desenvolveu-se principalmente na Califórnia (Altamont, Tehachapi e San Gorgonio) com a instalação massiva de parques eólicos nos anos 80 (*World Wind Energy Association (WWEA)*, 2008).

Na Tabela 2 pode-se constatar que de 2003 até 2008 o potencial acumulado de energia eólica ao final de cada ano em MW tem crescido num ritmo acelerado. Isso pode ser visualizado claramente na Tabela 2 indo dos EUA até ao Japão. Esses crescimentos vêm demonstrando certo interesse pelos países em energias renováveis, no caso, na energia eólica.

Ainda na Tabela 2, ao realizar uma análise das capacidades instaladas a partir dos continentes, nota-se uma grande disparidade, uma vez que de forma geral, o foco da energia eólica vem se concentrando nos continentes Europeu, Asiático e América do Norte. O interesse dos outros continentes pela energia eólica tem decrescido percentualmente no que tange a capacidade instalada, de 65,5% em 2006 passa para 61% em 2007, e obtém uma nova queda em 2008 (*WWEA*, 2008).

Em 2004 a Europa respondia por 70,7% das novas capacidades instaladas da energia eólica no mundo, após essa data, esse domínio começou a decrescer consideravelmente, até atingir os 32,8 % em 2008, enquanto que em outros continentes ocorreu o inverso, obtendo um aumento significativo, como na América do Norte de 5,9 % a 32,6% e Ásia de 18,1% a 31,5% (*WWEA*, 2008).

Tabela 2-Potencial acumulada de energia eólica ao final de anos.

PAÍS	Potência acumulada ao final de cada ano (MW)					
	2008	2007	2006	2005	2004	2003
EUA	25.170,00	16.818,80	11.603	9.149	6.752	6.352
Alemanha	23.902,80	22.247,40	20.622	18.427,50	16.628	14.609
Espanha	16.740,30	15.145,10	11.630	10.027,90	8.263	6.202
China	12.210	5.912	2.599	1.266	764	566
Índia	9.587	7.850	6.270	4.430	2.983	2.120
Itália	3.736	2.726	2.123	1.718,30	1.265	891
França	3.404	2.455	1.567	757,2	390	240
Reino Unido	3.287,90	2.389	1.962	1.353	897	704
Dinamarca	3.160	3.125	3.136	3.128	3.118	3.115
Portugal	2.862	2.130	1.716	1.022	523	299
Canadá	2.369	1.846	1.460	683	444	326
Holanda	2.225	1.747	1.559	1.224	1.078	912
Japão	1.880	1.528	1.309	1.040	940	644
Austrália	1.494	817,3	817,3	579	380	198
Irlanda	1.244,70	805	746	495,2	353	225
Suécia	1.066,90	831	571,2	509,1	442	399
Áustria	994,9	981,5	964,5	819	607	415
Grécia	989,7	873,3	757,6	573,3	466	398
Polônia	472	276	153	73	58	58
Noruega	428	333	325	268	160	112
Egito	390	310	230	145	145	69
Bélgica	383,6	286,9	194,3	167,4	97	68
Taiwan	358,2	279,9	187,7	103,7	nd	nd
Brasil	338,5	247,1	236,9	28,6	28,6	28,6
Turquia	333,4	206,8	64,6	20,1	20	20

Fonte: Word Wind Energy Association (WWEA) 2009

No ano de 2008, os países da América Latina e da África possuíam ,respectivamente, 0,6 e 0,5 % da capacidade instalada mundial de geração eólica de con-

forme a Figura 2. No que diz respeito ao acréscimo das novas capacidades instaladas no mundo, registrou-se declínio nesses continentes no mesmo ano (WWEA, 2008).

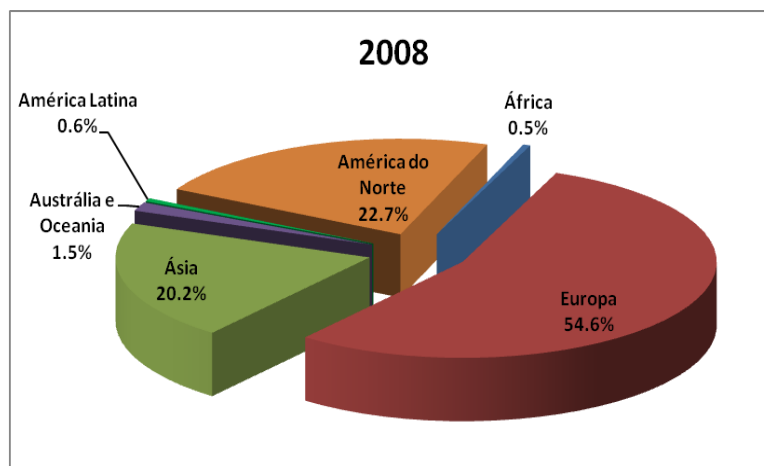


Figura 2-Capacidade instalada de energia eólica no mundo

Fonte: WWEA- 2009

1.2 Panorama da Energia Elétrica no Brasil

No Brasil, cerca de 90% da produção de energia elétrica é realizada em hidrelétricas. O restante advém principalmente de usinas térmicas, que operam com carvão, diesel e gás natural, e de usinas nucleares (Ortiz et al, 2002).

O uso da biomassa ocupa um lugar de importância, não apenas no seu aproveitamento na geração de energia elétrica, mas sob a forma de biocombustível. Entretanto, representa ainda uma pequena parcela, quando comparado ao uso dos combustíveis fósseis no sistema de transporte no país, que tem priorizado o sistema rodoviário e o uso de derivados de petróleo.

As usinas hidrelétricas construídas até hoje no Brasil resultaram em mais de 34.000 km² de terras inundadas para a formação dos reservatórios, e na expulsão ou, "deslocamento compulsório" de cerca de 200 mil famílias – aproximadamente 1 milhão de pessoas - diretamente atingidas. Os impactos reais decorrentes da perda de terras agricultáveis, da qualidade e disponibilidade de água doce, da biodiversidade e de recursos pesqueiros são difíceis de serem mensurados. Ainda assim, o aproveitamento futuro do potencial hidrelétrico em bacias como as dos rios Xingu, Tocantins, Araguaia e Ta-

pajós é considerado estratégico no Brasil, ameaçando a sustentabilidade das populações e ecossistemas na região amazônica (ISA, 2002).

No Brasil, as fontes alternativas de energia elétrica e combustíveis têm um enorme potencial para substituir as fontes convencionais, mesmo sem os grandes avanços em tecnologia (ISA,2002)

As fontes alternativas trazem impactos ambientais e sociais muito menores que as fontes convencionais, e os custos são competitivos com as fontes tradicionais em alguns casos, principalmente quando se consideram os custos sociais e ambientais atualmente não-internalizados.

1.2.1 Potencial Eólico Brasileiro

O resultado do primeiro leilão de comercialização de energia voltado exclusivamente para fonte eólica, realizado no dia 14 de dezembro de 2009, resultou na contratação de 1805,7 MW, a um preço médio de venda de R\$ 148,39/MWh que representou um deságio de 21,49% em relação ao preço inicial do leilão (Oliveira, 2008).

O leilão de energia eólica foi realizado na modalidade de reserva, que se caracteriza pela contratação de um volume de energia além do que seria necessário para atender à demanda do mercado total do país. O montante financeiro transacionado em decorrência do certame alcançará R\$19,59 bilhões ao final do período de vigência.

Com o leilão será viabilizada a construção de um total de 71 empreendimentos de geração eólica em cinco estados das regiões Nordeste e Sul, com período de vigência dos contratos de 20 anos.

Um total de 339 projetos, somando 10 mil MW de capacidade instalada, havia sido habilitado inicialmente para o leilão, mas o mercado apostou na contratação de 2 mil a 2,5 mil MW.

Para o presidente da Empresa de Pesquisa Energética – EPE, Mauricio Tolmasquim (2009)

Este leilão mostra que a diferença de preço entre as fontes eólicas e térmicas vem se aproximando e hoje é pequena, e, além disso, que a energia gerada através dos ventos é uma alternativa interessante, do ponto de vista econômico e ambiental, como complementação à geração hidrelétrica.

A Tabela 3 apresenta o resultado de leilão da energia eólica de reserva no Brasil no ano de 2009. No total foram leiloadas 1.805,70 MW de energia eólica.

Na sequência tem-se na Figura 3, o Atlas Eólico Brasileiro que ilustra a distribuição do potencial de energia eólica no Brasil. Na altura de 50 m.

Tabela 3-Resultado do leilão de energia eólica de reserva.

ESTADO	Projeto		Potência (MW)	
	QUANTIDADE	%	QUANTIDADE	%
Bahia	18	25,4	390	21,6
Ceará	21	29,5	542,7	30
Rio Grande do Norte	23	32,4	657	36,4
Rio Grande do Sul	8	11,3	186	10,3
Sergipe	1	1,4	30	1,7
Total Brasil	71	100	1.805,70	100

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2009

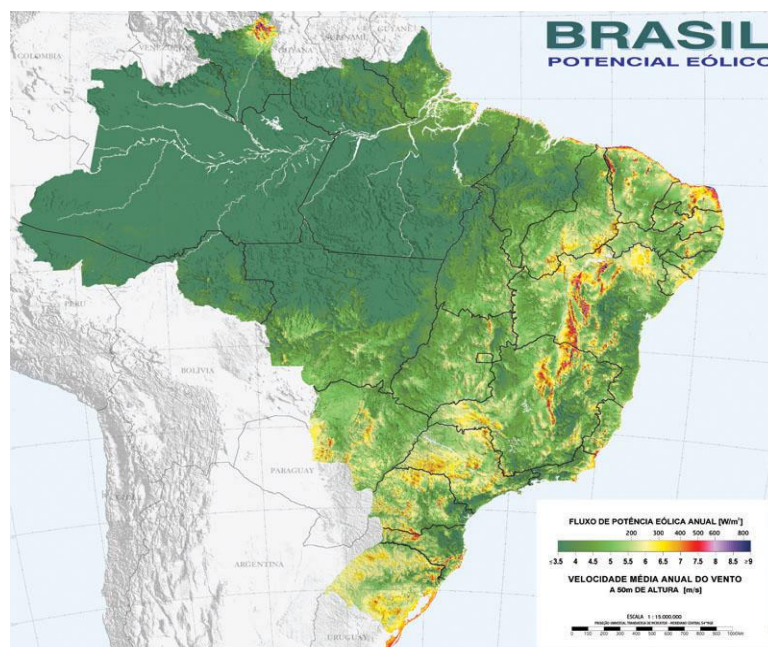


Figura 3- Mapa da velocidade média anual do vento (m/s) a 50 metros.

Fonte: Atlas Eólica do Brasil, 1998

1.3 Objetivo

A previsão de velocidade do vento aplicada ao setor energético possui dois enfoques principais: avaliação do potencial de geração eólica de uma determinada localidade e previsões de curto prazo para alimentar o processo decisório subjacente à operação do sistema elétrico.

O objetivo dessa dissertação se insere no segundo enfoque, que tem como finalidade específica desenvolver os modelos de previsão de velocidade do vento de curto prazo para geração de energia eólica. Usualmente estes modelos são classificados em duas categorias: modelos físicos e modelos de séries temporais (Giebel et al, 2003, Wu & Hong, 2007).

Os modelos físicos são baseados em uma descrição detalhada do terreno onde está instalado o parque eólico (por exemplo, a orografia e a rugosidade do solo), das turbinas eólicas (altura do cubo da turbina) e do layout do parque com a localização das turbinas. Esta categoria de modelos abrange métodos numéricos para previsão climática (numeric weather prediction - NWP). Tais modelos fornecem previsões da velocidade do vento para os pontos de uma malha ao redor das turbinas e por meio de interpolações podem ser obtidas previsões da velocidade do vento na altura do cubo da turbina eólica. Embora sejam mais precisos, estes modelos ainda demandam grande esforço computacional e por este motivo a sua utilização na previsão de curto prazo é bastante limitada, pois não permitem atualizar as previsões no tempo requerido pelos operadores de sistemas elétricos.

A segunda família de modelos inclui a modelagem de séries temporais, uma abordagem que na situação mais simples envolve a análise dos valores passados da própria variável que se pretende prever. A análise de séries temporais conta com uma ampla variedade de métodos estatísticos (ARIMA, análise harmônica, wavelets, etc.) e métodos de inteligência computacional (redes neurais artificiais, lógica fuzzy e sistemas neuro-fuzzy). Esta abordagem tem a vantagem de fornecer e atualizar as previsões na escala de tempo em que são tomadas as decisões operativas do sistema elétrico. No entanto, esta abordagem deve ser utilizada somente para previsão de curto prazo, pois a precisão das previsões obtidas diminui com a expansão do horizonte de projeção.

Nesta dissertação procura-se investigar o desempenho de modelagens estocásticas de previsão e modelagens baseadas em técnicas de inteligência artificial na previsão da velocidade do vento.

Na abordagem estatísticas, serão desenvolvidos modelos de Análise Harmônica e de Box-Jenkins. Por sua vez, na abordagem baseada em técnicas de inteligência artificial serão desenvolvidos modelos de rede neural artificial e neuro –fuzzy (ANFIS).

Para ilustrar a aplicação da metodologia considerou-se o município de São João do Cariri, situado na região central do Estado da Paraíba, onde está localizada uma das estações anemométricas do projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais), um projeto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE coordenado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC (Martins et al, 2007). Embora São João do Cariri não tenha um grande potencial eólico, a sua escolha foi motivada pelo fato desta localidade dispor de uma série histórica de registros anemométricos com resolução temporal de 10 minutos e sem lacunas nas observações durante um período superior a um ano. A série analisada refere-se ao ano de 2006 e pode ser obtida na página do projeto SONDA (<http://sonda.cptec.inpe.br>).

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada em sete capítulos, sendo o primeiro esta breve introdução. Na sequência, no capítulo 2 tem-se uma breve revisão bibliográfica sobre energia eólica, em que se apresenta o inventário das mais variadas tecnologias existentes para previsão do vento usando os modelos físicos (meteorológicos) e modelos estatísticos.

No capítulo 3 faz-se uma breve introdução dos modelos *neuro-fuzzy* (ANFIS), redes neurais artificiais e modelos estatísticos, em particular regressão harmônica e modelo Box & Jenkins.

As especificações ou configurações de cada modelo avaliado nesta dissertação são desenvolvidas ao longo do capítulo 4.

A comparação entre os desempenhos dos diferentes modelos é apresentada no capítulo 5.

Por fim, no capítulo 6 são resumidas as principais conclusões da dissertação , bem como as sugestões para futuros estudos no tema.