

# As políticas tecnológicas e o avanço da energia eólica: proposta de uma estrutura de análise

## Abstract

This paper aims at presenting a framework for wind energy technology policies constructed from a search on wind energy leading countries' policies – energy production and turbine manufacture. The first step to develop the framework was the categorization of the leading countries in (i) pioneers – Denmark, United States and Germany, which have leading the creation of a new industry from a radical innovation – and (ii) latecomers, Spain, India and China, which have made efforts to catch-up the leaders. One argues the advance of wind energy technology in pioneers as well as in latecomers countries have been encouraging by selective policies appropriated to country development and technology trajectory stages. One concludes the wind energy technology policies have to embrace aspects that go far beyond to minimize the spillovers or interfere on appropriability issues.

## Resumo

Este artigo tem por objetivo apresentar uma estrutura de análise das políticas tecnológicas em energia eólica, tendo por base um conjunto de países líderes – em produção de energia e fabricação de equipamentos. A construção dessa estrutura parte de uma categorização desses países em: (i) pioneiros – Dinamarca, Estados Unidos e Alemanha, que lideraram a criação de uma nova indústria a partir de uma inovação radical; e (ii) *latecomers* – Espanha, Índia e China, que empreenderam esforços de *catching-up*. Essa estrutura evidencia que o avanço da tecnologia tanto nos países pioneiros quanto nos *latecomers* foi impulsionado por um conjunto de medidas de caráter seletivo, adequadas tanto ao estágio de desenvolvimento do país quando da trajetória tecnológica da indústria em questão. Conclui-se, assim, que a política tecnológica para a energia eólica deve considerar aspectos que vão muito além de minimizar os efeitos dos *spillovers* de conhecimento ou atuar sobre questões de apropriabilidade.

## 1. Introdução

Este artigo tem por objetivo apresentar uma estrutura de análise das políticas tecnológicas em energia eólica, tendo por base um conjunto de países líderes – em produção de energia e fabricação de equipamentos. Os países são: Dinamarca, Estados Unidos, Alemanha, Espanha, Índia e China.

Busca-se com esta estrutura, por ora, ampliar o debate sobre as políticas de promoção à energia eólica, demonstrando que as políticas tecnológicas para energia eólica não podem prescindir de alguns instrumentos essenciais e que a configuração e o tempo de aplicação desses instrumentos dependem do estágio de desenvolvimento da indústria e também do

país. Numa etapa posterior do trabalho, essa estrutura é empregada para analisar a pertinência da estratégia brasileira de promoção à energia eólica.

Argumenta-se, a partir da construção da estrutura de análise, que o avanço da tecnologia nos países que lideram atualmente a indústria mundial de energia eólica foi impulsionado por um conjunto de medidas de caráter seletivo, específicas à tecnologia em questão e adequadas ao seu estágio de desenvolvimento.

A abordagem evolucionista do desenvolvimento econômico e os sistemas nacionais de setoriais de inovação embasam esse argumento. Essas abordagens são coerentes com o fato de que o avanço das energias alternativas coloca um duplo desafio: a transição para um novo paradigma tecnológico e a estruturação de uma política de inovação consistente que possibilite ao sistema nacional de inovação manter-se ativo. Além disso, essa abordagem possibilita que se incluam os países em desenvolvimento nessa discussão.

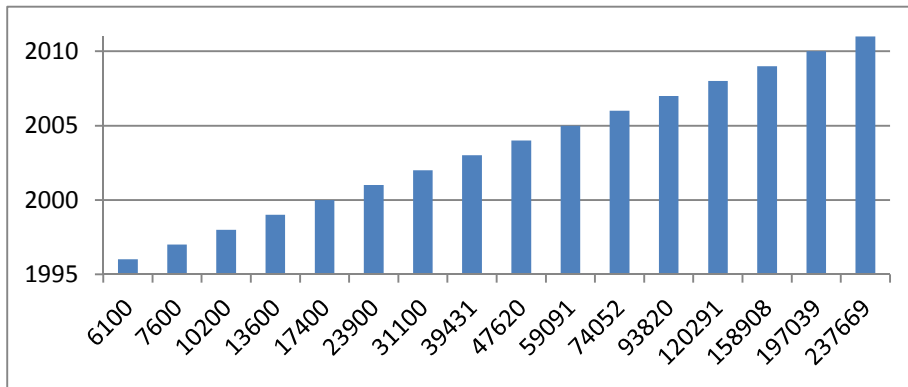
A estrutura de análise aqui apresentada se orienta pelos argumentos da literatura que embasam o trabalho. A construção dessa estrutura tem como ponto de partida um mapeamento das políticas de promoção à energia eólica dos países líderes, seja através de revisão bibliográfica, da busca em documentos oficiais ou *websites* institucionais, bem como da reconstituição da trajetória de desenvolvimento da energia eólica. Além disso, foi realizada uma reconstituição da trajetória da energia eólica nesses países, com vistas a definir o momento de entrada de cada um na indústria. Com isso, foi possível identificar os instrumentos e os estágios das políticas tecnológicas de cada um e também comparar a estratégia de desenvolvimento o tempo de aplicação dos instrumentos de política por cada país.

O artigo está organizado em cinco seções, contando esta introdução. A segunda seção traz um breve panorama da energia eólica, com vistas a demonstrar a posição dos países aqui retratados no cenário mundial dessa indústria. A terceira seção enfoca a necessidade de adicionar novos elementos ao debate sobre as políticas de promoção às fontes alternativas com base no referencial teórico que permeia o trabalho. A quarta seção apresenta a estrutura de análise das políticas tecnológicas, destacando as diferenças e o tempo de aplicação a partir da comparação entre pioneiros e *latecomers*. Na quinta seção, são feitas as considerações finais.

## **2. A indústria de energia eólica**

A energia eólica é a fonte alternativa de suprimento de energia elétrica que mais cresceu nas últimas duas décadas. A capacidade acumulada em energia eólica aumentou 30% ao ano, em média, desde meados da década de 90 até o final dos anos 2000. Entre 1995 e 2011, a capacidade acumulada em energia eólica no mundo dobrou a cada quatro anos aproximadamente, alcançando 237,6 GW em 2011 (Figura 1). Além disso, os geradores das turbinas atuais são 100 vezes maiores do que aqueles do início dos anos de 1980, quando a energia eólica estava dando seus primeiros passos (EWEA, 2009 a e b).

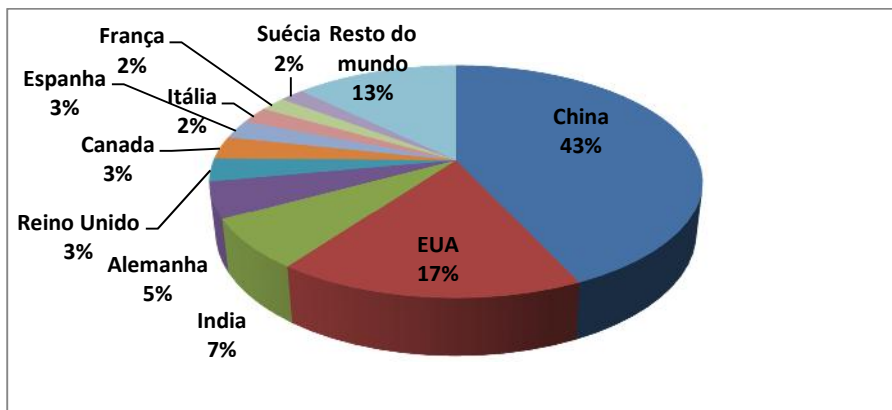
**Figura 1 - Capacidade acumulada em energia eólica no mundo – 1995-2011 (em MW)**



Fonte: GWEC (2012).

O crescimento da capacidade instalada foi por quase três décadas liderado por alguns países europeus, em especial pela Dinamarca, Alemanha e os Estados Unidos (os pioneiros). Em 2010, a China – um país em desenvolvimento e que entrou tardiamente na indústria – assumiu pela primeira vez a liderança em capacidade, ultrapassando os Estados Unidos. A China é hoje o principal motor do crescimento da indústria no mundo (Figura 2).

**Figura 2 - Distribuição da nova capacidade instalada no mundo entre Janeiro-Dezembro 2011 (em MW)**

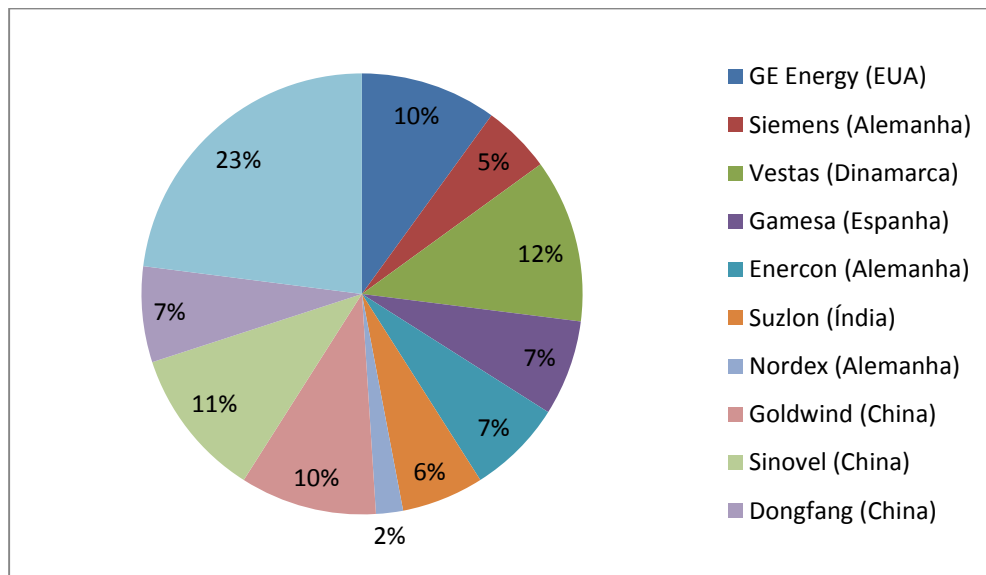


Fonte: GWEC (2012).

A geração de energia eólica é uma atividade intensiva em capital. As turbinas representam o principal custo de implantação de um parque eólico, variando entre 65% a 75% do custo total do projeto, dependendo do tamanho da turbina e do tamanho do projeto (EWEA, 2009 a e b). Daí uma razão fundamental para se promover uma indústria local de turbinas de componentes.

É essencial observar que a manufatura de turbinas eólicas é mundialmente dominada pelos mesmos países que são também líderes em capacidade instalada para geração de energia eólica (Figura 3).

**Figura 3 – Distribuição do *market-share* global, por fabricante de turbinas – 2010 (em % de MW instalado)**

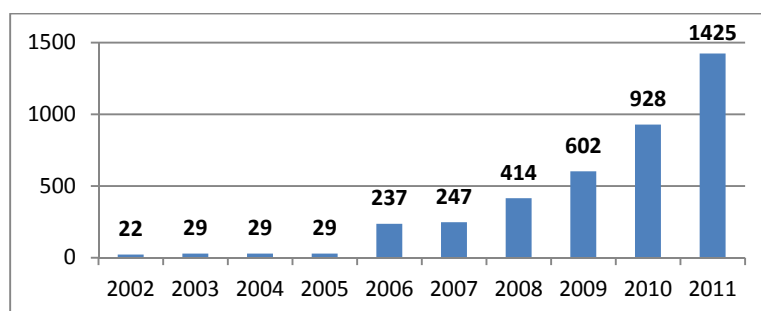


Fonte: Roland Berger, 2011.

A China, o maior *player* em energia eólica em 2011, vem tomando progressivamente parcelas de mercado que eram das empresas pioneiras. O país passou a dominar recentemente o seu mercado interno (antes liderado pelas multinacionais europeias) e também adentrou o mercado europeu com equipamentos 20% mais baratos (Roland Berger, 2011).

No Brasil, o parque industrial voltado para a fabricação de turbinas eólicas é composto essencialmente por subsidiárias de empresas multinacionais. A indústria de energia eólica começou a deslançar no país em 2009, quando os parques eólicos previstos pelo Programa de Incentivo às fontes alternativas (PROINFA) de 2004 (Figura 4) começaram a ser efetivamente implantados.

**Figura 4 - Evolução da capacidade instalada em energia eólica no Brasil (2002-2011) - em MW**



Fonte: BEN (2011) e ANEEL (2012)

A capacidade instalada em energia eólica no Brasil em 2011 era de apenas 1,6% do total da capacidade total de geração em energia elétrica no país, mas as 6% em 2020. Porém, até o final de 2011 o país já havia contratado 8.381 MW em capacidade de geração de energia eólica e já se previa que em 2020 o Brasil teria 6% de capacidade instalada em energia eólica compondo a sua matriz elétrica (EPE, 2011).

A capacidade já instalada foi erguida integralmente com tecnologia importada, sendo boa parte dela com turbinas montadas localmente por fabricantes estrangeiras que se instalaram no país nos últimos anos.

### **3. A adição de novos elementos ao debate sobre as políticas de promoção às fontes alternativas de energia**

Os mecanismos de criação de mercado se tornaram uma opção comum entre os países da OCDE nos anos 2000 como política de promoção das novas fontes renováveis (NFRs). A fixação de metas para cada Estado-membro para ampliar a participação das NFRs (European Commission, 2001) desencadeou a adoção desses mecanismos.

A popularização desses mecanismos entre os países europeus nos anos 2000 abriu espaço para um debate (Gan et al, 2007; Hvelplund, 2001; Lipp, 2007 etc) que ainda repercute atualmente. Pode-se dizer que esse debate está centrado na eficiência dos dois tipos principais de mecanismo: o Sistema de Cotas e o *Feed-in Tariffs* (FIT) – ou simplesmente, preço *versus* quantidade, em contribuir para o avanço das novas fontes de energia.

Em essência, esses mecanismos visam à correção das falhas de mercado que impedem a competição entre as NFRs e as fontes tradicionais, tendo por base os pressupostos da Economia Ambiental. Segundo esta abordagem, as fontes tradicionais de energia produzem externalidades negativas associadas ao seu uso. Recomenda-se, então, a intervenção do poder público para a correção dessas imperfeições por meio do favorecimento do consumo das energias limpas, que contribuem para conservação do bem público<sup>1</sup>.

Sendo assim, os mecanismos que regulam o preço ou quantidade consumida de eletricidade de base renovável (FIT ou Sistema de Cotas) estão fundamentalmente focados na demanda por novas tecnologias de energia. Esses mecanismos buscam alavancar um processo de aprendizado por meio do aumento do uso da tecnologia (*learning by using*), o que pode levar à redução dos custos das novas tecnologias de geração de energia. As intervenções na demanda devem ser complementadas, caso necessário, por medidas focadas de política tecnológica para corrigir falhas de mercado relacionadas às questões de apropriabilidade.

Este trabalho argumenta que outros elementos devem ser adicionados ao debate – indo além da discussão sobre a eficiência dos mecanismos de criação de mercado – e que as políticas de promoção às fontes alternativas devem ser tratadas dentro de um escopo mais amplo.

Deve-se destacar, em primeiro lugar, que a oferta de tecnologia também é um componente importante das políticas de promoção às novas fontes de energia. As novas tecnologias de energia não se diferenciam de outras grandes inovações radicais, tais como os semicondutores e os aviões, que se desenvolveram fortemente ancorados em recursos e programas governamentais de pesquisa. Estudos mostram que os países líderes em novas fontes renováveis vêm investindo em programas de P&D em energia eólica há várias décadas (Loiter & Norberg-Boom, 1999; Menanteau, 2000; Buen, 2006).

---

<sup>1</sup> As tecnologias limpas podem reduzir o custo marginal de realizar uma dada unidade de redução de poluição, possibilitando que os impactos sobre o meio-ambiente sejam minimizados a um menor custo total para a sociedade.

Em segundo lugar, defende-se que o debate sobre a promoção às fontes alternativas deve contemplar as abordagens alternativas à Economia Ambiental. Nesse sentido, é observado um conjunto de trabalhos (Kemp, 1997; Unruh, 2002, Tsoutos & Stamboulis, 2005; Sandén & Azar, 2005) que vêm tratando do desenvolvimento das novas fontes renováveis de energia e também tentando situar o papel das políticas de promoção dentro da perspectiva evolucionária do desenvolvimento econômico. Desses estudos, pode-se depreender que há um complexo quadro sócio-institucional que se constitui em torno das fontes tradicionais de energia – e coevolui com elas. Isso torna a competição das novas fontes de energia com as fontes tradicionais uma questão muito mais ampla do que a simples correção de preço.

As tecnologias de energia têm um forte componente sistêmico. Nenhum processo de transformação de energia é independente: o output de um processo é o input de outro processo. As externalidades de rede oriundas das interações sistêmicas se estabelecem entre tecnologias, infraestrutura e indústrias relacionadas e se multiplicam em razão tanto das próprias redes físicas, quanto das redes de informação que se formam ao entorno (Martin, 2000). Além disso, as novas tecnologias de energia devem adentrar os mesmos mercados das tecnologias tradicionais. As tecnologias tradicionais de energia já se beneficiaram enormemente dos retornos crescentes de adoção; dos efeitos de aprendizado (*learning by doing* e *learning by using*); dos ganhos de economia de escala; das externalidades de rede; do progresso técnico das indústrias relacionadas (interdependência tecnológica) (Kemp, 1997).

Em terceiro lugar, deve-se adicionar a perspectiva dos países em desenvolvimento. Nesse caso, parte-se da visão de que o aprendizado não é automático, nem previsível; e que não resulta exclusivamente dos investimentos em capital e recursos humanos, com preconiza a teoria tradicional (Nelson & Kim, 2005). Os benefícios de ordem ambiental não devem ser o único aspecto a ser considerado pelos países em desenvolvimento. A dependência tecnológica desses países se torna uma questão cada vez mais premente. Os países que optarem por incorporar as fontes alternativas em suas matrizes elétricas já se veem diante de três opções: a importação de equipamentos (e tecnologia), a atração de fabricantes multinacionais ou a realização de um esforço de aprendizado tecnológico.

A trajetória tecnológica dos países em processo de desenvolvimento passa por fases diferentes daquelas dos países avançados. Os países avançados partem geralmente de uma inovação radical, a partir da qual se estabelece posteriormente um design dominante e se atingem capacidades e escalas de produção relevantes. Por fim, o produto ou o processo se torna altamente padronizado, prevalecendo as inovações incrementais (Abernathy e Utterback, 1978). Já os países em desenvolvimento passam pelas seguintes fases: (i) a da aquisição da tecnologia importada (geralmente madura); (ii) a da assimilação, na qual o aumento da concorrência pode desencadear esforços locais, de caráter técnico (não de P&D), tal como a engenharia reversa<sup>2</sup>; e a (iii) de aperfeiçoamento da tecnologia, na qual as atividades de P&D se tornam relevantes – se a estratégia for a de realizar melhoramentos criativos de produtos já existentes (Kim, 2005).

Sendo assim, as políticas tecnológicas para as novas tecnologias de energia devem considerar aspectos que vão muito além da minimização das externalidades negativas ou os efeitos dos *spillovers* de conhecimento ou atuar sobre questões de apropriabilidade.

---

<sup>2</sup> Lembrando a instauração de um processo de imitação por meio de engenharia reversa também não é uma tarefa simples, tendo que vista que a atividades e habilidades necessárias são as mesmas do processo de inovação em P&D (Kim, 2005).

#### 4. As políticas tecnológicas para a energia eólica: pioneiros *versus* latecomers

Para a apresentação da estrutura de análise, propõem-se primeiramente uma categorização dos países líderes, dividindo-os em:

- (i) pioneiros (Dinamarca, Estados Unidos e Alemanha) – aqueles que lideraram a criação de uma nova indústria a partir de uma inovação radical, tendo como principal ponto de partida as políticas de oferta de tecnologia;
- (ii) *latecomers* ou seguidores (Espanha, Índia e China) – aqueles que entraram tardiamente na indústria, quando a trajetória tecnológica já está avançada, e empreendem esforços de *catching-up* com vistas a alcançar a fronteira internacional, começando com a importação de tecnologia.

Ao se contrapor as políticas e a trajetória desses dois grupos de países, é possível demonstrar que o estágio de desenvolvimento da tecnologia e do país muda a configuração e o tempo de aplicação das políticas.

A estrutura de análise compõe-se basicamente de esferas de atuação da política, de eixos de intervenção e de medidas de política relacionadas a estes eixos. Por eixos de intervenção entende-se aquilo que se pretende afetar, alterar ou desenvolver, tal como o avanço da tecnologia, por exemplo. Por medidas ou instrumentos de política (ou mecanismos de intervenção), entendem-se os meios pelos quais essa intervenção será concretizada (Cimoli et al, 2009).

O Quadro 5 resume os principais eixos de intervenção e os instrumentos de política empregados pelos países líderes para o desenvolvimento da tecnologia de geração de energia eólica, mostrando as diferenças entre as estratégias do primeiro e do segundo grupo de países. O Quadro 5 também mostra fatos relacionados aos instrumentos de política de cada país e o ano no qual eles foram instituídos, o que permite visualizá-los em uma linha do tempo.

Entre os países pioneiros, os três eixos de intervenção retratados no Quadro 5 estão presentes de início somente no pacote de instrumentos de políticas tecnológicas da Dinamarca. Nos Estados Unidos e na Alemanha, a aplicação da tecnologia e a interação usuário-produtor ganham relevância com o passar do tempo à medida que se percebe a natureza incremental da tecnologia. O fato de a Dinamarca considerar, desde o início, o avanço gradativo da tecnologia e os Estados Unidos e Alemanha terem como foco um grande salto tecnológico, explica essa diferença no *timing* das políticas.

**Quadro 5 – Estrutura de análise: políticas tecnológicas para energia eólica**

Eixos de intervenção	Principais instrumentos	Fatos principais		
		Dinamarca	Estados Unidos	Alemanha
<b>Pioneiros</b>				
<i>Oferta de tecnologia</i>	Programas de P&D	1977: projeto das turbinas de 640kW; 1981: Energy Research Program (EEP)	1974: Mod Program	1976: Growian project I Anos 80: Growian project II
<i>Aplicação da tecnologia e Interação usuário-</i>	Programas de P&D colaborativos	1982: Energy Research Program (EEP) do DEA	1990: Advanced Wind Turbine (AWT) Program (NREL) ( <i>1a. Fase</i> );	

<i>produtor</i>	Teses de Campo e Projetos demonstrativos/experimentais	1980: Individual Energy Projects	1990: Advanced Wind Turbine (AWT) Program (NREL) (2a. Fase);	1989: 100/250 MW Mass Testing Program
	Programas de padronização e certificação de turbinas	1979: Type Approval and System Certificate Program		1992: padronização e certificação se tornam obrigatórias
	Centros públicos de P&D em energia eólica (ou fontes renováveis)	1979: Risø Test Station (1984: Riso National Laboratory)	1984: National Renewable Energy Laboratory (NREL); 1994: National Wind Technology Center (NWTC); 2009: Wind Technology Test Center	1988: Fraunhofer-Institute for Wind and Energy System Technology (ISET)
<b>Latecomers</b>		<b>Espanha</b>	<b>Índia</b>	<b>China</b>
<i>Importação e absorção de tecnologia</i>	Projetos demonstrativos e experimentais	1982: instalação de uma turbina de 100kW construída localmente; 1985: projeto com a Alemanha para construção de uma turbina de grande porte	1987: instalação do primeiro parque eólico com turbinas com turbinas da Vestas	1989: instalação do primeiro parque eólico com turbinas da <i>American Company Wind Power</i>
	Transferência e/ou licenciamento de tecnologia estrangeira	Desde 1989: licenciamento de tecnologia dos Estados Unidos e da Dinamarca apoiado pelo <i>Ministério da Indústria e Energia</i> 1996: departamento de transferência de tecnologia no CIEMAT	1996: Suzlon faz o primeiro licenciamento de tecnologia e começa a fabricar turbinas	1996: <i>Riding Wind Program</i> do <i>State Planning Comitte</i> (primeiro passo para a importação de tecnologia)
	<i>Joint-ventures</i>	1994: acordo entre Vestas e Gamesa para a produção de turbinas de 500kW	A partir de 1991: formação de <i>joint-ventures</i> entre empresas indianas e fabricantes de turbinas	1997: início das <i>joint-ventures</i> entre empresas chinesas e fabricantes de turbinas
<i>Adaptação e capacitação tecnológica</i>	Programas de testes, padronização e certificação de qualidade	1996: sistema próprio de padronização e certificação aplicado pela ENAC - <i>Entidad Nacional de Acreditación</i>	2000: parâmetros nacionais para certificação de turbinas (com suporte do <i>Risø DTU</i> da Dinamarca)	2015: previsão para ter um programa próprio
	Centros públicos de P&D em energia eólica (ou fontes renováveis)	1990: Departamento de energia eólica no CIEMAT 2002: criação do CENER, que abriga o Departamento de Energia Eólica	1999: criação C-WET (com suporte do <i>Risø DTU</i> da Dinamarca) com estação de testes 2002: C-WET se torna instituição autônoma de P&D	-
<i>Autonomia tecnológica</i>	Programas de pesquisa, fundos públicos e outros incentivos à P&D pública e privada	A partir de 2004: incentivos fiscais as atividades de P&D das empresas privadas	A partir de 1997: programas de P&D e cooperação tecnológica para desenvolvimento de tecnologias nacionais	A partir de 2005: China RE Scale-up Program; 2006: fundo para pesquisa tecnológica e científica em fontes renováveis

Fonte: Elaboração Própria.



### *A oferta de tecnologia*

Logo após a primeira crise do petróleo, em 1973, vários países estruturaram programas de P&D em energia eólica. Esses programas tinham como meta o desenvolvimento de aerogeradores de grande porte que produzissem vários *megawatts* de energia, tendo como ponto de partida as competências acumuladas na indústria aeronáutica. Esses programas focavam o desenvolvimento de turbinas que fossem comparáveis com as estações convencionais de eletricidade (Street & Miles, 1996; Loiter & Norberg-Bhom, 1999; Menanteau, 2000).

O salto tecnológico previsto pelos Estados Unidos e Alemanha não ocorreu, já que os equipamentos na casa do MW não apresentaram desempenho satisfatório. Porém, os programas de P&D desses países tiveram papéis essenciais no desenvolvimento da indústria de energia eólica moderna, já que: (i) direcionaram a busca dos diversos atores da indústria para turbinas de grande porte, de três pás e conectadas à rede elétrica (Street & Miles, 1996); (ii) criaram oportunidades tecnológicas ao testar uma grande quantidade e tecnologias, materiais e ferramentas de análise; (iii) levaram a concluir que o desenvolvimento de turbinas eficientes e confiáveis pressupunha um processo gradativo de incremento da capacidade dos equipamentos – os modelos da indústria aeronáutica não poderiam substituir as experiências acumuladas em testes de campo (Loiter & Bhom, 1999; Menanteau, 2000; Mizuno, 2007).

### *Aplicação da tecnologia e interação usuário-produto<sup>3</sup>*

Paralelamente ao programa de turbinas de grande porte, a Dinamarca também iniciou um programa de turbinas de pequeno porte, partindo das experiências acumuladas na indústria de máquinas agrícolas. O programa atraiu empresas do setor de máquinas e equipamentos, pesquisadores, etc., criando uma rede de atores envolvidos com o desenvolvimento de sistemas eólicos (Buen, 2006). O caminho alternativo da Dinamarca preconizou que as pesquisas em energia eólica deveriam ter um enfoque mais voltado para aplicação, cooperação e interação do que para a pesquisa básica (Menanteau, 2000; Buen, 2006; Mizuno, 2007).

Com isso, ganharam destaque nos Estados Unidos e Alemanha, em meados dos anos de 1990, os projetos cooperativos com caráter aplicado e também os projetos demonstrativos ou experimentais e os testes de campo. Essas atividades permitiam envolver vários atores da indústria num único projeto (fabricantes de turbinas, operadores do sistema elétrico, pesquisadores, técnicos etc.) (Harbone & Hendry, 2009).

A estratégia alternativa da Dinamarca desvelou ainda outros dois aspectos essenciais que também favorecem o avanço da tecnologia e interação entre os atores da indústria: (i) a obrigatoriedade de padronização e certificação das turbinas<sup>4</sup> – atividades que demandam a realização de testes variados por instituições especializadas; (ii) a configuração de um centro de testes (que evoluiu para centro de pesquisa), que dá suporte ao aprimoramento da tecnologia e também funciona como meio de aproximação dos diversos atores da indústria.

---

<sup>3</sup> Esses dois eixos são tratados de forma agregada porque os instrumentos de política a eles relacionados atuam tanto na aplicação da tecnologia quanto na interação usuário-produtor da tecnologia.

<sup>4</sup> Na indústria de energia eólica o que se busca com mecanismos de padronização é a qualidade uniforme das turbinas e a garantia de que o parque eólico tenha um desempenho satisfatório de forma a mitigar os riscos do projeto (Mizuno, 2007; IEA, 2011).

Desde 1979, a Dinamarca já contava com um sistema de certificação de turbinas. O *RisØ National Test Station for Small Windmills*, responsável pela certificação de qualidade das turbinas (requisito necessário para a obtenção dos subsídios pelos produtores de energia) foi criado em 1978. O interesse mútuo do produtor e do usuário da tecnologia em aperfeiçoar os equipamentos para obter a aprovação do RisØ abriu caminho para a interação, de forma que efeitos de aprendizado (*learning by doing, learning by using etc.*) são um dos principais fatores que explicam o avanço da energia eólica (Menanteau, 2000; Buen, 2006; Mizuno, 2007). Os sistemas de padronização e certificação em turbinas eólicas da Dinamarca são atualmente referência mundial em padronização e certificação de equipamentos. A Alemanha, apesar de ter regulamentado essa atividade somente em 1992, também é referência no assunto.

Tratando os países líderes de uma perspectiva geral, observa-se que ao longo do desenvolvimento da indústria, os centros de pesquisa em energia eólica (ou fontes renováveis) foram mudando seus papéis e abarcando novos. Na Alemanha e na Dinamarca, esses centros evoluíram de estações de testes para grandes centros de pesquisa que atuam em todos os estágios do desenvolvimento da tecnologia: pesquisa, design, testes e demonstração em grande escala (IEA, 2011). Nos Estados Unidos, as atividades de pesquisa de pesquisa básica deram lugar à pesquisa aplicada. Os centros norte-americanos também abrigam atualmente grandes estações de testes.

Atualmente, as atividades de P&D dos centros de pesquisa desses países perpassam todos os aspectos da indústria (meteorologia, turbinas, interface com o setor elétrico etc.); e os testes ainda são uma atividade essencial para identificar problemas relacionados ao *design* e às barreiras técnicas na interface com o setor elétrico. As pesquisas e os testes são feitos em parceria com empresas, já que a cooperação com a indústria (que entra com contrapartida financeira) é fundamental para aumentar a confiabilidade dos sistemas e reduzir os custos da energia eólica.

Nos países *latecomers*, os eixos de intervenção e os instrumentos de política empregados representam, com relativa clareza, as fases da política de promoção à tecnologia em questão. Essas fases são marcadas pela evolução da absorção da tecnologia importada para a autonomia tecnológica. As fases das políticas são bastante evidentes especialmente para a China que é o país que tem a estratégia mais agressiva de aprendizado e domínio da tecnologia.

#### *A importação e absorção da tecnologia*

Os parques eólicos dos *latecomers* foram instalados com o apoio dos países líderes na condição de projetos demonstrativos ou experimentais. Todavia, estes projetos têm um caráter diferente daqueles dos países líderes. Na China e na Índia, esses projetos derivaram da tentativa dos países líderes em viabilizar a geração eólica e abrir novos mercados para suas fabricantes de turbinas. Os primeiros projetos experimentais da Espanha, por outro lado, tiveram um caráter mais autônomo, pois partiram da iniciativa do próprio país em testar a viabilidade da tecnologia.

A Índia e a China começaram a dar sinais de que buscariam um caminho próprio na década de 1990, ao tomarem as primeiras iniciativas de licenciamento ou transferência de tecnologia ou formação de *joint-ventures* entre empresas locais e empresas estrangeiras.

Recursos estes que a Espanha já vinha se utilizando desde meados dos anos de 1980<sup>5</sup>. Além disso, vale lembrar que a *joint-venture* entre a espanhola Gamesa dinamarquesa Vestas em 1994 possibilitou a Espanha dar um salto tecnológico ao acesso às turbinas mais avançadas para a época (Mizuno, 2007).

Na China, o *Riding Wind Program* do *State Planning Committee* em 1996, formalizou a estratégia de construir uma indústria doméstica de turbinas através da importação de tecnologia estrangeira, tendo como alvo o licenciamento de tecnologia de empresas que não figuravam entre as líderes de mercado (Lewis & Wiser, 2007; Ru *et al.*, 2012). Em 1997, a China também reduziu as tarifas de importação de turbinas e componentes com tecnologia de ponta e passou a negociar a formação do *joint-ventures* entre empresas chinesas e empresas estrangeiras oferecendo como moeda de troca o acesso ao mercado local (Ru *et al.*, 2012);

Na Índia, a importação e a absorção de tecnologia estrangeira não fez parte de uma política deliberada. A política indiana teve como foco explícito a cooperação tecnológica de instituições nacionais (públicas ou privadas) com instituições de pesquisa de países como Dinamarca e Alemanha. Todavia, as *joint-ventures* entre empresas indianas e empresas dos países pioneiros – alavancadas pela abertura do mercado indiano ao IDE no início dos anos de 1990 – consistiram no principal canal de acesso do país à tecnologia importada. Também houve licenciamento de tecnologia, especialmente por iniciativa da Suzlon (Mizuno, 2007).

#### *A adaptação e capacitação tecnológica*

Instrumentos voltados à adaptação da tecnologia ao contexto local e a criação de capacidades que construirão as bases para desenvolvimentos autônomos futuros, também compuseram a estratégia de promoção dos *latecomers*. Nesse eixo, destacam-se a replicação de dois instrumentos empregados pelos países líderes: os programas de testes, padronização e certificação de qualidade e os centros de P&D com foco em energia eólica (ou fontes renováveis). Esses programas ganham novos papéis no contexto dos *latecomers*.

Como ocorre nos países líderes, nos *latecomers* esses programas também forçam o aprimoramento dos processos e produtos e a interação usuário-produtor. Porém, nesses países, esses instrumentos também estimulam a adaptação da tecnologia e incrementam o processo de aprendizado tecnológico, especialmente quando há parâmetros nacionais e capacitação local para realizar os testes de avaliação dos equipamentos.

Nesse aspecto, a Espanha está à frente da Índia por contar com um sistema próprio de padronização e certificação desde meados dos anos de 1990. E, a Índia está à frente da China por ter um sistema próprio de padronização e certificação pertinente às condições de vento e às instabilidades da rede elétrica desde 2000 (Lundsager *et al.*, 2005). A China ainda está no início de um processo de construção de sistema próprio de padronização e certificação de aerogeradores. Ao final de 2011, foi firmado um acordo entre a China e os Estados Unidos: o *US-China Renewable Energy Partnership*, que prevê o desenvolvimento em colaboração de um sistema de padronização, teste e certificação para as fontes renováveis (IEA, 2010).

---

<sup>5</sup> Em meados dos anos de 1990, duas fabricantes locais de turbinas espanholas, Made e Ecotècnia, já atuavam com níveis sustentáveis de competência e experiência em equipamentos de pequeno porte (até 250 kW), desenvolvidas a partir da combinação do licenciamento de tecnologia com desenvolvimento tecnológico interno (Neij *et al.*, 2003).

Os centros públicos de pesquisa em energia eólica (ou fontes renováveis), por sua vez, nascem da necessidade de prover informações, dedicar-se à medição dos ventos, capacitar recursos humanos e de testar localmente as turbinas (seja para comprovar sua viabilidade ou para atender as demandas de certificação e padronização), atividades que também colaboram para adaptação e a capacitação tecnológica. À medida que a indústria avança e as políticas acompanham esse progresso, as atividades dos centros de pesquisa em energia eólica podem evoluir para a orientação e realização de pesquisas básicas e aplicadas. Esses centros assumem, assim, papéis mais relacionados com a busca e a manutenção da autonomia tecnológica.

Entre os *latecomers*, a Espanha é o país que tem o centro com escopo de atuação mais amplo (o Centro Nacional de Energías Renovables - CENER, fundado em 2002<sup>6</sup>), considerando os estágios da pesquisa em energia eólica (*design*, testes etc.), e a infraestrutura física de testes e pesquisa mais relevante. As atividades de teste, adaptação e desenvolvimento da tecnologia já eram realizadas pelo *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas* - CIEMAT desde o início dos anos de 1990<sup>7</sup>.

Na Índia, o *Centre for Wind Energy Technology* (C-WET), criado com estação de testes em 1999, ganha *status* formal de centro de P&D em 2002. Pela listagem dos testes<sup>8</sup> realizados pelo C-WET, desde a sua fundação até 2011, é possível verificar a evolução do tamanho dos equipamentos testados<sup>9</sup>, especialmente das empresas indianas que atuam somente no mercado local, denotando os resultados da forte interação entre o C-WET e a *Indian Turbine Manufacturers Association* (Lundsager *et al.* 2005).

Na China não há um centro público de pesquisa em energia eólica (ou fontes renováveis). Foi criado recentemente um departamento de testes de turbinas de grande porte no *China Electric Power Research Institute* (CEPRI), o que não supre a carência do país por um centro de P&D em energia eólica (IEA, 2010).

### *A autonomia tecnológica*

A necessidade de empreender esforços próprios de P&D para além da adaptação e da imitação por parte das empresas locais e as novas medidas de política que estimulem o incremento dessas atividades constituem evidências de que os *latecomers* estão em busca da autonomia tecnológica.

Assim com nos demais eixos de intervenção, a Espanha iniciou esse processo antes dos demais *latecomers*. A busca pela autonomia tecnológica se tornou evidente com o lançamento do *Plan de Fomento às Energías Renovables* de 1999, que enfatizava a necessidade de incrementar o fomento e os incentivos à P&D. A partir do Plano, foram direcionados mais recursos para o *Instituto para la Diversificación y El Ahorro de La Energía* (IDAE). A energia eólica, por ser considerada a tecnologia mais madura entre as demais fontes renováveis, passou a receber o maior volume de recursos (Dinica, 2008).

Na Índia, a mudança de foco dos programas de P&D, a partir de 1997, teve por objetivo estimular esforços locais de inovação, especialmente da indústria de turbinas de médio porte. Desde 1997, os programas de P&D voltam-se principalmente para a produção de

---

<sup>6</sup> <http://www.cener.com>

<sup>7</sup> <http://www.ciemat.es/>

<sup>8</sup> <http://www.cwet.tn.nic.in/>

<sup>9</sup> No início dos anos 2000, esses equipamentos ficavam entre 250kW e 350kW, hoje já há empresas testando turbinas de 850kW a 1000kW.

novos conhecimentos a serem empregados no desenvolvimento local de turbinas eólicas adequadas às especificidades do país. A colaboração entre a indústria e as instituições de pesquisa e os usuários finais da tecnologia (Mizzuno, 2007), tendo o C-WET como um importante ponto de interação entre produtores e usuários de tecnologia também ganhou destaque na política tecnológica indiana.

Na China, desde que a tecnologia foi introduzida no país, o fomento e os incentivos em P&D em eólica se deram através de programas ou subsídios pontuais, estando sujeitos às mudanças do contexto político (Wang *et al.*, 2010). Esse cenário começou a mudar em 2005, quando foi lançado o *China Renewable Energy Scale-up Program*, em cooperação com o Banco Mundial – o objetivo do programa é aprimorar a manufatura e a montagem de turbinas eólicas através de atividades de P&D. A promoção à P&D de fontes renováveis se formalizou com a publicação da *Renewable Energy Promotion Law* também em 2005, que previa a criação de um fundo para apoiar pesquisa tecnológica e científica nessas fontes (Cherni & Joana, 2007; Wang *et al.*, 2010).

## 5. Discussão e Conclusão

A estrutura de análise apresentada evidenciou, em primeiro lugar, que em se tratando das políticas tecnológicas para energia eólica, a intervenção governamental de fato vai muito além da minimização dos efeitos de *spillovers* ou das questões de apropriabilidade, solucionados, geralmente, com concessão de incentivos à P&D ao setor privado.

Considerando os países pioneiros, observou-se que a oferta de tecnologia, através de grandes programas públicos de P&D, teve papel fundamental para criar as bases iniciais da indústria e também para direcionar os seus esforços tecnológicos futuros. O caráter sistêmico da tecnologia, o que é típico dos sistemas de energia, e da própria inovação, também foram incorporados pelas políticas tecnológicas.

Vale lembrar que as medidas de fomento à interação e à cooperação se tornaram o elemento central dessas políticas quando a tecnologia já tinha atingido um centro grau de desenvolvimento e a indústria já se começavam a estabelecer relações entre usuário e produtor da tecnologia. Nesta etapa, ganharam destaque os centros de pesquisa e os mecanismos de padronização e certificação, que tanto forçavam a interação quanto o rápido desenvolvimento da tecnologia. E, também, criaram-se as bases para o desenvolvimento de um contexto sócio-institucional próprio para a fonte eólica, tendo em a imposição de parâmetros e criação de instituições próprios da tecnologia.

Com isso, os países pioneiros definiram alguns instrumentos essenciais de intervenção das políticas tecnológicas para energia eólica. A importância e a especificidade desses instrumentos são comprovadas pelo fato que os *latecomers* replicam esses instrumentos. Esses países também estimularam cooperação entre os atores da indústria, por exemplo. Todavia, esses instrumentos foram aplicados em momentos e contextos diferentes daqueles dos países pioneiros, tendo conseqüentemente, outros papéis, que não o estimular o avanço da tecnologia, mas o de fomentar a capacitação e o aprendizado local. Além disso, os *latecomers* adicionaram novos instrumentos às suas políticas tecnológicas, em especial, àqueles relacionados à importação da tecnologia.

Isto comprova que os países as trajetórias tecnológicas dos países que entram tardiamente na indústria têm fases diferentes das daqueles países que partem de inovação radical,

começando pela aquisição da tecnologia importada e terminando com o aperfeiçoamento da tecnologia (Seção 3). Nos *latecomers*, as atividades de P&D ou oferta de tecnologia, por exemplo, ganharam destaque quando se iniciou a busca pela autonomia tecnológica e a concorrência no mercado internacional se fez premente. Nos pioneiros, a oferta de tecnologia é o primeiro passo para o desenvolvimento da tecnologia. Dessa forma, a estrutura de referência comprova que a configuração e o tempo de aplicação desses instrumentos dependem do estágio de desenvolvimento da indústria e também do país em questão.

Nessas circunstâncias, o artigo cumpre o papel de abrir a discussão sobre o papel desses países na indústria de energia de energia e também no desenvolvimento das outras fontes renováveis. Demonstra-se que se o objetivo do país for o de tomar uma posição ativa no desenvolvimento das tecnologias que irão compor sua matriz elétrica, este país deve contar com um pacote de políticas tecnológicas seletivas ou, em outras palavras, específicas à tecnologia e ao contexto local. Também se demonstra que a possibilidade de se desenvolver uma indústria doméstica ainda que a trajetória tecnológica já tenha se iniciado. Para isso, é preciso estabelecer uma política que estimule esforços tecnológicos locais primeiro para absorver e posteriormente para dominar a tecnologia importada.

Vale lembrar que as questões ambientais e aquelas relacionadas à dependência energética vêm forçando a entrada ou aumento da participação dessas fontes nos sistemas elétricos nacionais de um número cada vez maior de países. Deveriam, nesse caso, os países em desenvolvimento repetirem suas histórias de dependência tecnológica, limitando-se uma participação passiva nas novas indústrias que emergem em torno dessas fontes? Ou ainda, é possível o país assumir uma posição ativa quando não participou da criação a indústria?

A proposta de estrutura de análise para políticas tecnológicas em energia eólica apresentada pode contribuir para responder a essas perguntas, orientando, assim, a reflexão sobre promoção das fontes renováveis, especialmente dos países em desenvolvimento.

Trazendo essa discussão para o Brasil, cabe, em primeiro lugar, observar que o país não é um *latecomer*, pois não empreendeu esforços tecnológicos próprios. Enquanto que os *latecomers* contam atualmente com fabricantes domésticas de turbinas com participação expressiva no mercado internacional, a capacidade brasileira de manufatura desses equipamentos é integralmente formada por subsidiárias de multinacionais oriunda dos países líderes.

Em segundo lugar, que o país não estabeleceu uma política tecnológica para energia eólica ou fontes alternativas de energia. Apesar do crescimento significativo da capacidade instalada nesta fonte de energia no país nos últimos anos e as projeções de que esta fonte contribua cada vez mais na geração total de eletricidade do país, não há no Brasil nenhum tipo de incentivo ou medida voltada especificamente para estimular esforços tecnológicos locais em energia eólica. O que se tem são programas P&D em energia elétrica (como o programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel) ou programas de fomento à inovação em geral. Também não há centros de P&D de orientação específica, nem programas nacionais de certificação ou padronização de turbinas. Ou seja, apesar do tamanho do seu mercado e da sua capacidade industrial, até agora o Brasil se absteve de tomar uma posição mais ativa na indústria de energia eólica ou mesmo de buscar espaços próprios na cadeia de turbinas e componentes.

## Referências Bibliográficas

- ABERNATHY W. J., UTTERBACK, J. M. Patterns of industrial innovation, **Technology Review**, Vol. 80 (June-July), 1978.
- ANEEL, Resumo Geral dos Novos Empreendimentos de Geração, **Agência Nacional de Energia Elétrica**, Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Geração – SFG, Versão abril de 2012. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=37>; acesso em abril de 2012.
- BEN, Balanço Energético Nacional, Empresa de Pesquisa Energética, **Ministério das Minas e Energia**, 2011 (ano-base 2010).
- BUEN, J. Danish and Norwegian wind industry: The relationship between policy instruments, innovation and diffusion, **Energy Policy** 34, pp. 3887-3897, 2006.
- CIMOLI, M., DOSI, G., STIGLITZ, J.E. (Edit.), **Industrial Policy and Development: The Political Economy of Capabilities Accumulation**, Oxford University Press, New York, United States, 2009.
- DINICA, V., Initiating a sustained diffusion of wind power: The role of public – private partnerships in Spain, **Energy Policy** 36, p. 3562-3571, 2008.
- EPE, Plano Decenal de Expansão de Energia 2020, **Empresa de Pesquisa Energética**, MME, Brasília, 2011. Disponível em: [www.eletrobras.com](http://www.eletrobras.com), acesso em Janeiro de 2012.
- EUROPEAN COMMISSION, Promotion of Electricity from Renewables Energy Source in the International Electricity Market, **European Commission**, Brussels, Directive 2001/77/EC, 2001.
- EWEA, The Economics of Wind Energy, **European Wind Energy Association**, March 2009.
- EWEA, Wind Energy – The Facts – Part I: Technology, **European Wind Energy Association**, March 2009 b.
- FOXON, T. J., PEARSON, P. J. G. Towards improved policy process for promoting innovation in renewable electricity technologies in the UK, **Energy Policy** 35, 1539-1550, 2007
- GAN, L., ESKELAND, G.S, KOLSHUS, H.H. Green electricity market development: Lessons from Europe and the US, **Energy Policy** 35, 144-155, 2007.
- GWEC, Global Wind Report: Annual market update 2010, **Global Wind Energy Council**, 2011. Disponível em: [www.gwec.net](http://www.gwec.net), acesso em Setembro de 2011.
- HARBONE, P., HENDRY, C. Pathways to commercial wind power in the US, Europe and Japan: The role of demonstration projects and field trials in the innovation process, **Energy Policy** 37, p. 3580–3595, 2009.
- HVELPLUND, F. Renewable Energy Governance Systems, **Institute for Development and Planning**, Aalborg University, Aalborg, 2001. Disponível em: <http://www.i4.auc.dk/environmentalmanagement/Institutions%20and%20Organisations/Renewable%20Energy.pdf>
- IEA, Technology Roadmap: China Wind Energy Development Roadmap 2050, **OCDE/International Energy Agency**, 2010.
- KEMP, R., **Environmental Policy and Technical Change: A Comparison of the Technological Impact of Policy Instruments**, Cheltenham, Edward Elgar, 1997.
- KIM, L. **Da Imitação à Inovação: A Dinâmica do Aprendizado Tecnológico da Coreia**, Clássicos da Inovação (traduzido por Maria Paula G. D. Rocha), Editora da Unicamp, Campinas, SP, 2005.
- LEWIS, J. I., WISER, R. H. Fostering a renewable energy technology industry: An international comparison of wind industry policy support mechanisms, **Energy Policy** 35, 1844-1857, 2007.
- LIPP, J. Lessons for effective renewable electricity policy from Denmark, Germany and the United Kingdom, **Energy Policy** (2007), doi:10.1016/j.enpol.2007.05.015

- LOITER, J. M., NORBERG-BOHM, V. Technology policy and renewable energy: public roles in the development of new energy technologies, **Energy Policy** 27, pp. 85-97, 1999.
- LUNDSAGER, et al, Wind Energy (Systems) Consulting Knowledge transfer, International Experience, Presentation at a visit by Danida and IFU at Risø National Laboratory, RisøWindConsult, Wind Energy Systems (VES) Programme, **Department of Wind Energy RisøNational Laboratory**, DK-4000 Roskilde, June 2005.
- MARTIN, J-M. Introduction. In: BOURGEOIS, B., FINON, D., MARTIN, J-M (Orgs), **Énergie et Changement Technologique: Une approche évolutionniste**, Economica, Paris, 2000.
- MENANTEAU, P. **L'énergie éolienne: la réussite d'une dynamique d'innovations incrémentales**, In: BOURGEOIS, B., FINON, D., MARTIN, J-M, **Énergie et Changement Technologique: Une approche évolutionniste**, pp. 224-247, 2000.
- MIZUNO, E. Cross-border Transfer of Climate Change Mitigation Technologies: The Case of Wind Energy from Denmark and Germany to India, submitted to the Department of Urban Studies and Planning in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor in Philosophy in Technology and Public Policy at the Massachusetts Institute of Technology, June 2007.
- NELSON, R.R., KIM, L. Introdução. In: NELSON, R.R., KIM, L. (Orgs.), **Tecnologia, Aprendizado e Inovação: As experiências das Economias de Industrialização Recente**, Clássicos da Inovação (traduzido por Calor D. Szlak), Editora Unicamp, Campinas, SP, 2005.
- ROLAND BERGER, Wind Turbine Manufacturing – a case for consolidation: Industry overview and key trends, Strategy Consultants, Hamburg, Germany, November 2011.
- RU, P., ZHI Q., ZHANG, F. ZHONG X. LI, J., SU, J. Behind the development of technology: The transition of innovation modes in China's wind turbine manufacturing industry, **Energy Policy** 43, p. 48-69, 2012.
- SANDÉN, B. A., AZAR, A., Near-term technology policies for long-term climate targets – economy wide versus technology specific approaches, **Energy Policy** 33, 1557-1576, 2005.
- STREET, P., MILES, I. Transition to alternative energy supply technologies: The case of wind energy, **Energy Policy**, Vol. 24 (5), p. 413-425, 1996.
- TSOUTOS, T.D., STAMBOULIS, Y.A. The sustainable diffusion of renewable energy technologies as an example of an innovation-focused policy, **Technovation** 25, p. 753-761, 2005.
- UNRUH G., C. Understanding carbon lock-in, **Energy Policy** 28 (12), pp. 817–30, 2000.
- ZHOU, W., ZHANG B., ZOU G., BI, J., WANG, K., Joint R&D in low-carbon technology development in China: A case study of the wind-turbine manufacturing industry, **Energy Policy** 46, p. 100-108, 2012.
- WANG, F., YIN, H., LI, S. China's renewable energy policy: Commitments and challenges, **Energy Policy** 32, p.1872-1879, 2010.