

Tendências do Preço da Electricidade na Industria Eólica Global para 2050

Wagner S. Oliveira (wagneroliveira@ua.pt) ; Antonio J. Fernandes (afer@ua.pt) & Elizabeth T. Pereira (melisa@ua.pt)¹

¹ Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial, Universidade de Aveiro
Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

RESUMO

Este artigo tem o objectivo demonstrar os cenários traçados pelo *Global Wind European Council*, considerando a capacidade instalada e produção de energia eólica no mundo, consumo energético *per capita*, as taxas médias de crescimento global do PIB e da população, tomando-se como base a matriz energética global actual. Até 2050, as fontes renováveis de energia serão responsáveis por 56% de toda a demanda global de energia primária. Sua participação na geração de electricidade será de 80% até lá (GWEC/IEA, 2008). Foi adoptado regressão linear como metodologia de projecção de dados analisados. Como resultado será determinado qual o cenário que mais aproxima-se das actuais tendências de mercado face ao custo para o ano 2050, com as respectivas curvas de oferta e procura no mercado global.

Palavras-chave: Energia eólica; Tendências e dados de mercado eólico global.

1. VISÃO GLOBAL DA ENERGIA EÓLICA

A energia renovável, combinada ao uso racional e eficiente de energia, será capaz suprir metade da demanda energética global até 2050. O relatório, “Revolução Energética – Um Caminho Sustentável para um Futuro de Energia Limpa”, conclui que a redução das emissões globais de CO₂ em até 50% nos próximos 43 anos é economicamente viável, e que a adopção maciça de fontes de energia renovável também é tecnicamente possível – falta apenas o apoio político para que isso ocorra. Enquanto o mundo industrializado precisa urgentemente repensar sua estratégia energética, o mundo em desenvolvimento deve aprender com os erros passados e construir suas economias, desde o começo, sobre as bases sólidas de um fornecimento de energia sustentável. Uma nova infra-estrutura deve ser construída para possibilitar que isso aconteça. A energia como factor essencial para a evolução e desenvolvimento das actividades humanas. A preocupação para a obtenção de fontes energéticas tem sido uma constante. Ao longo de sua história, o ser humano passou por diversos períodos, nos quais dominaram matrizes energéticas diferentes, como a biomassa, o carvão e o petróleo. Hoje, são buscadas novas

alternativas, estimuladas, sobretudo, em virtude da crise energética e do prejuízo ambiental causado pela queima de combustíveis fósseis. (Gipe, 1998). Uma das alternativas é a implementação de novas energias limpas – quanto ao aspecto da poluição ambiental ou redução das emissões de CO₂ – renováveis quando à utilização dos recursos naturais. A energia eólica apresenta um panorama bastante diferente das demais Tecnologias de Energias Renováveis (TER), pois actualmente já apresenta maturidade tecnológica e escala de produção industrial. Isso foi resultado de significativos investimentos em I&D e uma política de criação de mercado através de incentivos em vários países, especialmente na Alemanha, Dinamarca, EUA, e mais recentemente na Espanha, entre outros (IEA, 2008).

Hoje essa tecnologia está prestes a ser tornar economicamente viável para competir com as fontes tradicionais de geração de electricidade, além de um existir um grande potencial eólico a ser explorado em diversos países (Alexandre, 2001; Vesterdal, 1992). Existem oportunidades de melhoramentos tecnológicos bem identificados internacionalmente que deverão levar ainda a reduções de custo e permitem estabelecer metas bastante ambiciosas para instalação de sistemas de geração nos próximos 30 anos. Metade da electricidade consumida no mundo poderia ser gerada por fontes renováveis, diz a segunda edição do estudo *[R]evolução Energética: Perspectivas para uma Energia Global Sustentável*, de 27/10/2008 na Alemanha. Actualmente, apenas 13% da procura mundial de energia primária é fornecida por fontes renováveis (Cordeiro, 2008). De acordo com a pesquisa elaborada pelo Centro Aeroespacial da Alemanha, encomendado pela Greenpeace e pela Comissão Europeia de Energia Renovável (EREC, na sigla em inglês), investimentos agressivos em renováveis poderiam resultar em uma indústria com receita de US\$ 360 mil milhões anuais. O cenário *[R]evolução Energética* tem como meta para 2050 a redução de 50% das emissões mundiais de CO₂, em relação aos níveis de 1990, a fim de manter o aumento da temperatura global abaixo de 2°C. A eficiência energética tem o papel principal na redução destas emissões. (IEA, GWEC, 2008).

2. PERSPECTIVAS PARA A ENERGIA EÓLICA GLOBAL

Os recentes aumentos excessivos do preço do petróleo colocaram a discussão sobre a segurança de oferta no topo da agenda política e energética internacional. Uma das razões para a alta do preço do barril é o esgotamento progressivo do suprimento de todos os combustíveis fósseis – petróleo, gás e carvão – e a consequente elevação dos

custos de produção. Os tempos de petróleo e gás natural baratos estão chegando ao fim. Urânio, o combustível das usinas nucleares, também é um recurso finito. As reservas de energias renováveis, por outro lado, são tecnicamente acessíveis a todos e abundantes o suficiente para fornecer, para sempre, cerca de seis vezes mais energia do que é consumido hoje no mundo. (EWEA, 2008; Wind Power Monthly, 2001).

Tecnologias de energias renováveis variam entre si em termos de desenvolvimento técnico e competitividade económica, mas há uma diversidade de opções cada vez mais atractivas. As fontes de energia renovável incluem vento, biomassa, painéis fotovoltaicos, colectores solares para o aquecimento de água, geotérmica, oceânica e hidroeléctrica. Entre elas, há duas características em comum: a baixa emissão de gases de efeito estufa e o uso de fontes naturais virtualmente inesgotáveis. Algumas dessas tecnologias já são competitivas - e devem se tornar ainda mais - com investimentos em pesquisa e desenvolvimento, a possibilidade de valor comercial no mercado de créditos de carbono e, por outro lado, o aumento contínuo no preço dos combustíveis fósseis. Em paralelo, há um enorme potencial para a redução no consumo de energia, sem que isto implique na redução na oferta de serviços de energia. Estudos apresentam uma série de medidas de eficiência energética que, juntas, podem reduzir substancialmente a demanda de energia em indústrias, residências e no sector de serviços. (Flavin, 1999; SunMedia GmbH, 1999).

Apesar de a energia nuclear produzir pouco dióxido de carbono em comparação às energias fósseis, sua utilização implica em múltiplas ameaças à sociedade e ao meio ambiente. Dentre, estão os impactos ambientais da mineração, o processamento e o transporte de urânio, o risco da proliferação de armas nucleares, o problema insolúvel dos resíduos nucleares e a ameaça constante de acidentes graves. Por isto, a opção nuclear não foi considerada nesta análise. A solução para nossas necessidades futuras de energia encontra-se no maior uso das fontes de energias renováveis, tanto para transporte, quanto para geração de energia eléctrica (Heier, 1998).

O relatório sobre *As Perspectivas para a Energia Eólica Global*, do Global Wind Energy Council (GWEC, fórum global para o sector da energia eólica, com mil e quinhentas empresas, organizações e instituições em mais de cinquenta países) indica que, até 2050, um terço da electricidade a nível mundial pode ser fornecida pelo vento. A capacidade das turbinas a vento implementadas nesta escala evitaria que cento e treze milhões de toneladas de CO₂ fossem libertados na atmosfera em 2050. Este relatório coloca firmemente a energia eólica como uma das fontes de energia mais importantes

para o século XXI. A capacidade de produção de energia já é de cinquenta e nove mil megawatts e está a aumentar bastante cada ano. De acordo com os dados consolidados em dezembro de 2008 pela GWEC a capacidade global instalada alcançou 120.791 MW, distribuídos conforme a Tabela 1:

Tabela 1 - Top 10 Capacidade Instalada Total

Países	MW	%
EUA	25,170	20.8%
Alemanha	23,903	19.8%
Espanha	16,754	13.9%
China	12,210	10.1%
Índia	9,645	8.0%
Itália	3,736	3.1%
França	3,404	2.8%
Reino Unido	3,241	2.7%
Dinamarca	3,180	2.6%
Portugal	2,862	2.4%
Resto do mundo	16,686	13.8%
Total top 10	104,105	86.2%
Total do mundo	120,791	100.0%

Fonte: GWEC, 2009

O nível de custo atingido já é favorável, devido à progressão tecnológica que tem havido. A disponibilidade de localizações também tem aumentado, apesar de parte da população estar contra pois “estraga a paisagem”. É uma solução que não serve para larga escala, devido à sua intermitência e dificuldade de armazenamento. Para além disso é necessário muito espaço para a sua instalação. O imperativo da mudança climática exige nada menos do que uma Revolução Energética. No cerne desta revolução, está uma mudança no modo como usamos, distribuímos e consumimos energia. Os cinco princípios-chaves para essa mudança são: 1) Implementar soluções renováveis, especialmente através de sistemas de energia descentralizados; 2) Respeitar os limites naturais do meio ambiente; 3) Eliminar gradualmente fontes de energia sujas e não sustentáveis; 4) Promover a equidade na utilização dos recursos; 5) Desvincular o crescimento económico do consumo de combustíveis fósseis.

Em um curto período de tempo, o desenvolvimento da energia eólica resultou no estabelecimento de um próspero mercado global. As maiores turbinas de vento do mundo, várias delas instaladas na Alemanha, têm capacidade de 6 MW. O custo de novos sistemas tem, contudo, estagnado em alguns países nos últimos anos devido ao

contínuo aumento da demanda e investimentos consideráveis dos fabricantes no aperfeiçoamento da tecnologia e desenvolvimento e introdução de novos sistemas. O resultado é que o factor de aprendizagem observado para turbinas de vento construídas entre 1990 e 2000 na Alemanha era somente 0,94. Contudo, desde que os desenvolvimentos técnicos proporcionaram aumentos de produção, os custos de geração de electricidade tendem a diminuir. Prevê-se um maior potencial de redução de custos, com a taxa de aprendizagem correspondentemente mais alta. Enquanto o relatório *Perspectivas da Energia Mundial 2004* da IEA espera que a capacidade eólica mundial cresça somente a 330 GW até 2030, a Avaliação Energética Mundial das Nações Unidas prevê um nível de saturação global de cerca de 1.900 GW para o mesmo período. Já a versão 2006 do *Perspectivas Global de Energia Eólica* projecta uma capacidade global em torno de 3.000 GW até 2050. Uma curva de experiência para turbinas eólicas é derivada da combinação dos actuais factores de aprendizagem observados com uma previsão de alto crescimento no mercado, orientado através do *Panorama Global de Energia Eólica*, indicando que os custos para turbinas eólicas serão reduzidos em 40% por volta de 2050. O desenvolvimento de um cenário global energético exige o uso de um modelo multi-regional que reflecta as diferenças estruturais significativas entre os diversos sistemas de oferta de energia ao redor do mundo. Optou-se pela divisão feita pela IEA - *International Energy Agency* das regiões mundiais utilizada na série de relatórios do *Panorama Mundial Energético*, já que essa agência também apresenta as mais abrangentes estatísticas globais de energia. A Tabela 2 mostra a lista de países de cada uma das dez regiões mundiais da análise da IEA.



Tabela 2 - Definição das regiões mundiais

Região mundial	Países
Europa OCDE	Áustria, Bélgica, República Checa, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Islândia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Holanda, Noruega, Polónia, Portugal, Eslováquia, Espanha, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido
Norte América OCDE	Canadá, México, Estados Unidos
Pacífico OCDE	Japão, Coreia do Sul, Austrália, Nova Zelândia
Economias em Transição	Albânia, Arménia, Azerbaijão, Belarus, Bósnia-Herzegovina, Bulgária, Croácia, Estónia, Iugoslávia, Macedónia, Geórgia, Casaquistão, Quirguistão, Letónia, Lituânia, Moldávia, Roménia, Rússia, Eslovénia, Tajiquistão, Turcomenistão, Ucrânia, Uzbequistão, Chipre, Gibraltar, Malta2
China	China
Ásia Oriental	Afeganistão, Butão, Brunei, Camboja, Taipei, Fiji, Polinésia Francesa, Indonésia, Kiribati, Coreia do Norte, Laos, Malásia, Maldivas, Myanmar, Nova Caledónia, Papuá Nova Guiné, Filipinas, Samoa, Singapura, Ilhas Salomão, Tailândia, Vietnã, Vanuatu
Sul da Ásia	Bangladesh, Índia, Nepal, Paquistão, Sri Lanka
América Latina	Antígua e Barbuda, Argentina, Bahamas, Barbados, Belize, Bermuda, Bolívia, Brasil, Chile, Colômbia, Costa Rica, Cuba, Dominica, República Dominicana, Equador, El Salvador, Guiana Francesa, Granada, Guadalupe, Guatemala, Guiana, Haiti, Honduras, Jamaica, Martinica, Antilhas Holandesas, Nicarágua, Panamá, Paraguai, Peru, Porto Rico, São Cristóvão e Nevis-Anguilla, Santa Lúcia, São Vicente e Granadinas, Suriname, Trinidad e Tobago, Uruguai, Venezuela
África	Argélia, Angola, Benin, Botsuana, Burkina Fasso, Burundi, Camarões, Cabo Verde, República Central Africana, Chade, Congo, República Democrática do Congo, Costa do Marfim, Djibuti, Egito, Guiné Equatorial, Eritreia, Etiópia, Gabão, Gâmbia, Gana, Guiné, Guiné-Bissau, Quênia, Lesoto, Libéria, Líbia, Madagascar, Malati, Mali, Mauritânia, Ilhas Maurício, Marrocos, Moçambique, Namíbia, Niger, Nigéria, Ruanda, São Tomé e Príncipe, Senegal, Seychelles, Serra Leoa, Somália, África do Sul, Sudão, Suazilândia, Tanzânia, Togo, Tunísia, Uganda, Zâmbia, Zimbábue
Oriente Médio	Barein, Irã, Iraque, Israel, Jordânia, Kuwait, Líbano, Omã, Qatar, Arábia Saudita, Síria, Emirados Árabes, Iêmen

Fonte: WEO 2004

Crescimento populacional

As taxas de crescimento populacional utilizadas para o período até 2030 foram as mesmas do WEO 2004. Para o período de 2030 a 2050, consideraram-se os parâmetros utilizados na revisão de 2004 do documento *Perspectivas de População Mundial* das Nações Unidas.

A previsão é que a população mundial crescerá 41% entre 2003 e 2050, aumentando de 6,5 mil milhões para quase 9,1 mil milhões de pessoas. A taxa de crescimento populacional diminuirá no período de projecção, de 1,2% entre 2003 e 2010 para 0,42% entre 2040 e 2050. A população das regiões em desenvolvimento continuará crescendo mais rapidamente, mesmo com a previsão de declínio contínuo das economias de

transição. As populações dos países da Europa e do Pacífico pertencentes à OCDE devem atingir seu ápice numérico por volta de 2020/2030, seguido de um significativo declínio. A população dos países da América do Norte pertencentes à OCDE continuará a crescer, mantendo o mesmo percentual na população global.

Em compensação, o percentual da população nas “regiões em desenvolvimento” em relação à população mundial deve aumentar de 76% para 82% até 2050. O percentual da população vivendo em países da OCDE diminuirá, assim como a população da China, dos actuais 20,8% para 16%. A África permanece como a região que terá o maior crescimento populacional. Em 2050, 21% da população mundial estará nesse continente. Satisfazer as necessidades de energia das populações cada vez mais numerosas das regiões em desenvolvimento sem destruir o meio ambiente, é um desafio-chave para alcançar uma oferta global e sustentável de energia.

Crescimento económico

O crescimento económico é um dos vectores fundamentais do aumento na demanda de energia. Desde 1971, cada 1% de aumento do Produto Interno Bruto (PIB) global é acompanhado de 0,6% de aumento no consumo de energia primária. Desvincular a demanda de energia do crescimento do PIB é, portanto, um pré-requisito para a redução da demanda no futuro. Para fazer um quadro comparativo do crescimento das diferentes economias mais condizente com a realidade, que pudesse reflectir as diferenças no padrão de vida, considerou-se taxas de crescimento de PIB adaptadas às taxas de equiparação de poder de compra (PPP, em inglês). Todos os dados sobre desenvolvimento económico do WEO 2004 utilizaram por base as taxas de crescimento do PIB referenciadas pela PPP. O presente estudo segue a mesma abordagem, utilizando-se as taxas de PPP ao invés de taxas de mercado cambial convencionais. Os índices monetários referem-se ao valor do dólar norte-americano em 2000. Como o Cenário de Referência WEO 2004 só refere-se ao período até 2030, fez-se necessária a adopção de outros critérios referenciais de crescimento económico para o período posterior. O Cenário de Emissões do IPCC 2000 propicia um guia de caminhos potenciais para o desenvolvimento até o ano de 2050, oferecendo quatro referências básicas e grupos de cenários relacionados. A média anual mundial da taxa de crescimento do PIB adoptada no WEO para o período de 2002 a 2010 (3,7%) é significativamente maior que em qualquer dos cenários do IPCC, mas mostra um rápido declínio para 2,7% no período 2020-2030. De 2030 em diante optou-se pelas taxas

adoptadas no grupo de cenários B2 do IPCC, que descreve um mundo cuja ênfase está em soluções locais para a sustentabilidade económica, social e ambiental, combinada com um nível intermediário de desenvolvimento económico. O resultado desta análise é a previsão de diminuição gradativa da taxa de crescimento do PIB em todas as regiões do mundo nas próximas décadas. Espera-se um crescimento médio do PIB mundial de 3,2% ao ano no período entre 2002-2030, um pequeno decréscimo em relação aos 3,3% do período de 1971 a 2002. Dessa maneira, a taxa de 2002 a 2030 fica em 2,7%. As economias da China e outros países asiáticos devem crescer mais rapidamente, seguidas pelas economias em transição e da África. O ritmo da economia chinesa deve diminuir com o seu amadurecimento, mas se tornará, de qualquer modo, a maior economia do mundo no começo da década de 2020. O PIB da Europa e do Pacífico pertencentes à OCDE crescerão pouco menos que 2% ao ano na projecção para o período, enquanto o crescimento económico da América do Norte pertencente à OCDE será levemente maior. A fracção do PIB da OECD em relação ao PIB global (nos valores ajustados pela PPP) diminuirá de 58% em 2002 para 38% em 2050. O relatório *Perspectivas da Energia Mundial 2006* prevê uma taxa de crescimento médio anual do PIB mundial para o período 2004-2030 de 3,4%, um pouco mais alta do que os 3,2% do WEO de 2004. Em paralelo, o WEO 2006 espera que o consumo final de energia em 2030 seja 4% mais alto que do que o do WEO 2004. Uma análise dos impactos do crescimento da economia na demanda de energia sob o *Cenário de Revolução Energética* mostra que um aumento médio de 0,1% do PIB mundial no período de 2003 a 2050 acarretaria um aumento da procura final de energia de cerca de 0,2%.

Tabela 3 - Desenvolvimento do PIB mundial por regiões, de 2002 a 2050

	2002-2010	2010-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050	2002-2050
Mundo	3,7%	3,2%	2,7%	2,3%	2,0%	2,7%
Europa OCDE	2,4%	2,2%	1,7%	1,3%	1,1%	1,7%
América do Norte OCDE	3,2%	2,4%	1,9%	1,6%	1,5%	2,1%
Pacífico OCDE	2,5%	1,9%	1,7%	1,5%	1,4%	1,8%
Economias em transição	4,6%	3,7%	2,9%	2,6%	2,5%	3,2%
China	6,4%	4,9%	4,0%	3,2%	2,6%	4,1%
Ásia Oriental	4,5%	3,9%	3,1%	2,5%	2,2%	3,2%
Sul da Ásia	5,5%	4,8%	4,0%	3,2%	2,5%	3,9%
América Latina	3,4%	3,2%	2,9%	2,6%	2,4%	2,9%
África	4,1%	3,8%	3,4%	3,4%	3,4%	3,6%
Oriente Médio	3,5%	3,0%	2,6%	2,3%	2,0%	2,6%

Fonte: Perspectivas da Energia Mundial, IEA

Projecções de preço da energia renovável

As opções de tecnologias de energia renovável disponíveis hoje têm diferenças marcantes em termos de maturidade técnica, custos e potencial de desenvolvimento. Enquanto a energia hídrica tem sido largamente utilizada há décadas, outras tecnologias, como a gasificação da biomassa, ainda precisam abrir caminho até sua maturidade económica (Nakicenovic, N. *et al*, 1998). Algumas fontes renováveis, devido a sua própria natureza, incluindo a energia solar e a eólica, propiciam uma oferta variável, exigindo uma coordenação controlada pela rede eléctrica. Mas, embora na maioria dos casos sejam tecnologias descentralizadoras – sua potência é gerada e usada localmente pelos consumidores – no futuro poderão ser empregadas em larga escala, na forma de parques eólicos costeiros e estações concentradas de energia solar (CSP). Utilizando as vantagens individuais das diferentes tecnologias e promovendo a coordenação entre as fontes renováveis, pode-se disponibilizar uma vasta gama de opções para um mercado maduro e integrado, passo a passo, às actuais estruturas fornecedoras de energia, o que poderá proporcionar um portfolio bastante variado de tecnologias ecologicamente correctas para a oferta de calor, electricidade e combustíveis. A maioria das tecnologias renováveis aplicadas hoje está em fase inicial de desenvolvimento de mercado. Por isso, seus custos são geralmente mais altos que os dos sistemas convencionais com os quais competem (DEWI, 1998; Walker John F., 1997). Os custos também podem depender das condições locais como o regime de ventos, a disponibilidade da oferta de biomassa barata ou a necessidade essencial de cumprir o licenciamento ambiental na construção de uma usina hidroeléctrica. Contudo, há um grande potencial para a redução de custos, através de aperfeiçoamentos técnicos e de fabricação em larga escala, especialmente no longo prazo definido neste artigo. Para identificar custos de desenvolvimento no longo prazo, foram aplicadas curvas de aprendizagem que reflectem a correlação entre a capacidade cumulativa e a evolução dos custos. Para muitas tecnologias, o factor de aprendizagem (ou razão de progressão) cai na variação entre 0,75 para sistemas menos maduros e 0,95 ou mais para tecnologias bem estabelecidas. Um factor de 0,9 significa que os custos estão previstos para cair em 10% toda vez que o output cumulativo da tecnologia dobra. As razões de progressão específicas de tecnologias são derivadas de uma revisão bibliográfica. Isto mostra, por exemplo, que o factor aprendizagem para módulos solares PV têm sido bastante constantes em 0,8 nos últimos 30 anos enquanto a energia eólica varia de 0,75 no Reino Unido para 0,94 na Alemanha, que tem um mercado mais amadurecido para esta tecnologia. Em um curto período de tempo, o

desenvolvimento da energia eólica resultou no estabelecimento de um próspero mercado global. As maiores turbinas de vento do mundo, várias delas instaladas na Alemanha, têm capacidade de 6 MW (Snel, 1998). O custo de novos sistemas tem, contudo, estagnado em alguns países nos últimos anos devido ao contínuo aumento da demanda e investimentos consideráveis dos fabricantes no aperfeiçoamento da tecnologia e desenvolvimento e introdução de novos sistemas. A curva de experiência para turbinas eólicas é derivada da combinação dos atuais factores de aprendizagem observados com uma previsão de alto crescimento no mercado, orientado através do *Panorama Global de Energia Eólica*, indicando que os custos para turbinas eólicas serão reduzidos em 40% por volta de 2050. Os custos levemente maiores de geração de eletricidade (comparados com combustíveis convencionais) apresentados no Cenário [R]Evolução Energética são compensados, em grande parte, pela demanda reduzida por eletricidade. Tomando-se por base um custo médio de US\$ 30/MWh para a implementação de medidas de eficiência energética, o custo adicional para o suprimento de eletricidade no Cenário [R]Evolução Energética chegará a um máximo de US\$10 mil milhões por ano em 2010. Estes custos adicionais, que representam os investimentos da sociedade para o suprimento seguro de energia, economicamente viável e ambientalmente responsável, continuam a diminuir depois de 2010. É esperado que o preço médio do barril de petróleo aumente de US\$52,5 por barril em 2005 para US\$100 em 2010, e continue aumentando até chegar a US\$140/barril em 2050. Os preços de importação do gás natural devem quadruplicar entre 2005 e 2050, enquanto os preços do carvão devem quase dobrar, chegando a US\$360/tonelada em 2050. Também é considerado um aumento no preço da tonelada de carbono equivalente, de US\$10/tonelada em 2010 para US\$50/tonelada em 2050. (EUA, 2008).

3. CONSTRUÇÃO DOS CENÁRIOS GLOBAIS ALTERNATIVOS

O cenário “moderado” é usado como o cenário base ou de referência (C_0). Três diferentes cenários são simulados (C_1 , C_2 e C_3) para o futuro da energia eólica global. O cenário “moderado” é o mais conservador baseando-se nas projecções de *2007 World Energy Outlook* da Agência Internacional de Energia e IEA. Este cenário leva em consideração as políticas e decisões existentes, bem como as suposições tais como a contínua reforma de mercado do gás e da electricidade, a liberalização das fronteiras do comércio da energia e as recentes políticas de combate a poluição (IEA, 2008). O cenário “moderado” leva em conta todas as medidas políticas para suportar as energias

renováveis embora ainda estejam inactivas ou em estágio de planeamento pelo mundo afora. Também assume que os objectivos traçados pelos países para as renováveis ou energia eólica sejam implementados com sucesso. Mais ainda é considerado como o aumento da confiança dos investidores em energia eólica como resultado dos sucessos obtidos neste segmento das energias renováveis a nível global (Monteiro, 1998).

O cenário de referência é baseado em um contexto de referência publicado pela IEA no documento *Perspectivas da Energia Mundial 2004*, extrapolado para o período pós-2030. Comparado a essas projeções, o novo relatório *Perspectivas da Energia Mundial 2006* considerou uma taxa média anual de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) mundial levemente maior, de 3,4% ao invés de 3,2%, para o período entre 2004-2030. O relatório de 2006 prevê um consumo final de energia, em 2030, 4% maior que o estudo de 2004. Uma análise sensível do impacto do crescimento econômico na demanda de energia sob o Cenário da Revolução Energética mostra que um aumento da média mundial do PIB de 0,1% (sobre o período de 2003-2050) leva a um aumento na demanda energética final de cerca de 0,2%.

Foi adoptado do cenário “moderado” do *Global Wind Energy Outlook 2008*, por ter maior proximidade com os factos actuais do mercado de energias renováveis para a construção dos cenários alternativos. As variáveis consideradas e analisadas para a elaboração dos cenários apresentados neste artigo foram a Capacidade Global Instalada de energia eólica (CGI_{EE}), Produção Global de energia eólica (PG_{EE}), Consumo Energético *per capita* (CE_{PC}), Taxa Média Global de crescimento do PIB (TMG_{PIB}) e Taxa Média global de crescimento da população (TMG_{pop}). O consumo global de energia final (GWh) foi realizado considerando os percentuais de penetração da energia eólica considerando a referencia e eficiência esperada para o período, segundo a GWEC. A relação entre o consumo o volume produzido de energia oscila de 2,8% a 27,2% para o período de 2007-2050.

O “*Cenário Alternativo 1*” foi desenvolvido considerando alterações nas variáveis produção e consumo globais de energia eólica. Neste cenário considera-se que muitas medidas políticas para suportar as energias renováveis embora ainda estejam inactivas ou em estágio de planeamento pelo mundo afora não sejam implementadas. Também assume que os objectivos traçados pelos países para a energia eólica não sejam implementados com sucesso e tal facto implique no uso de outras tecnologias de energias renováveis (fotovoltaica). Este conjuntura leva a uma redução de 60% na produção e um aumento no consumo de apenas 30% em relação ao cenário de referência

(C₀) no período 2007-2050, resultando numa Taxa de Crescimento Médio Anual (TMCA) de 5,3% e 14,1% para a produção e consumo, respectivamente.

O “*Cenário Alternativo 2*” foi desenvolvido considerando também alterações nas variáveis produção e consumo globais de energia eólica. Neste cenário considera-se que muitas medidas políticas para apoiar as energias renováveis embora ainda estejam inactivas ou em estágio de planeamento pelo mundo afora sejam implementadas em parte. Também assume que os objectivos traçados pelos países para a energia eólica sejam implementados parcialmente com sucesso e tal facto implique no uso de outras tecnologias de energias renováveis (fotovoltaica e biomassa). Este conjuntura leva a uma redução de 50% na produção e um aumento no consumo de 60% em relação ao cenário de referência (C₀) no período 2007-2050, resultando numa TMCA de 5,9% e 14,7% para a produção e consumo, respectivamente.

O “*Cenário Alternativo 3*” foi desenvolvido considerando alterações nas variáveis produção e consumo globais de energia eólica. Neste cenário considera-se que todas as medidas políticas para apoiar as energias renováveis embora ainda estejam inactivas ou em estágio de planeamento pelo mundo afora sejam implementadas, nomeadamente por parte do utilizador final de energias renováveis. Também assume que os objectivos traçados pelos países para a energia eólica sejam implementados relativamente com sucesso e tal facto implique pouco no uso de outras tecnologias de energias renováveis (fotovoltaica e biomassa). Este conjuntura leva a uma redução de 37% na produção e um franco aumento no consumo de 120% em relação ao cenário de referência (C₀) no período 2007-2050, resultando numa TMCA de 6,5% e 15,6% para a produção e consumo, respectivamente.

A partir dos dados analisados usando a função de *Regressão Linear Polinomial (de ordem 5)* do software Microsoft Excel, considerando como referência o cenário “*moderado*” para 2050 e encontram-se as equações de produção e consumo globais de energia eólica contidas na Tabela 4.

Tabela 4 – Equações de Produção e Consumo Globais face aos Cenários em 2050

Produção global de energia eólica			Consumo global de energia eólica		
		r ²			r ²
C ₀	$P_0 = 370.6x^5 - 11984x^4 + 128738x^3 - 479688x^2 + 644366x$	0.9985	$C_0 = 44.247x^5 - 1953.9x^4 + 26208x^3 - 112154x^2 + 138663x$		0.9905
C ₁	$P_1 = 213.9x^5 - 6964.9x^4 + 77297x^3 - 321277x^2 + 486039x$	0.9978	$C_1 = 56.602x^5 - 2509.6x^4 + 33709x^3 - 143989x^2 + 177066x$		0.9905
C ₂	$P_2 = 240.02x^5 - 7801.4x^4 + 85870x^3 - 347679x^2 + 512427x$	0.9983	$C_2 = 68.957x^5 - 3065.4x^4 + 41211x^3 - 175824x^2 + 215469x$		0.9905
C ₃	$P_3 = 273.97x^5 - 8888.9x^4 + 97016x^3 - 382001x^2 + 546731x$	0.9985	$C_3 = 93.667x^5 - 4176.9x^4 + 56213x^3 - 239493x^2 + 292275x$		0.9905

Fonte: Autores.

Como pode-se observar na Tabela 4, o coeficiente de determinação (r^2) que representa a proporção da variação, que é explicada pela variável independente no modelo de regressão adoptado. Como o cenário base (C_0) os r^2 calculado são 0,9985 e 0,9905 para produção e consumo globais de energia eólica (correlação de 99,85% e 99,05% - muito boa).

Para a determinação das quantidades de produção e consumo globais de energia eólica no ano 2050 foi considerado o equilíbrio de mercado, ou seja, produção igual ao consumo (produção = consumo) para cada cenário desenvolvido (C_0 , C_1 , C_2 e C_3).

Foi ainda considerado o custo de 1.300 €/por MWh (1.300.000 €/por GWh) e factor de redução de custo de 0,80 para determinação do valor futuro do custo do MWh consumido e produzido. Portanto, o custo da energia eólica tem baixado acentuadamente, e a indústria global já reconhece estar entrando na “fase de comercialização”, portanto na teoria da curva de aprendizagem. (GWEC, 2009).

A análise de Cenários Globais Alternativos tem como objectivo mostrar as possibilidades e a sensibilidade da produção e consumo a nível mundial. Tais resultados dependem das diferentes opções escolhidas por parte da procura e diferentes suposições para taxas de crescimento da oferta de energia eólica.

4. RESULTADOS ESPERADOS NOS CENÁRIOS

CENÁRIO BASE: Cenário “moderado” do GWEC/IEA

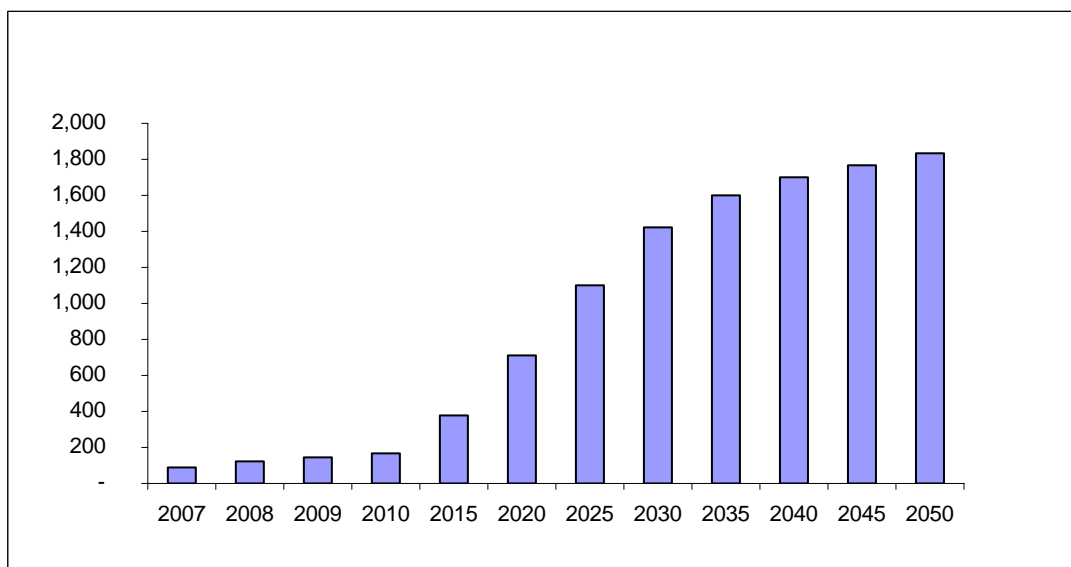


Figura 2 - Capacidade Instalada Global Acumulada para 2007-2050 (GWe)

Fonte: Cenário Moderado, GWEC, 2009

A capacidade global instalada de energia eólica (CGI_{EE}) alcançará 1.834 GWe, ou seja 18,5 vezes a capacidade actual (ano-base: 2007).

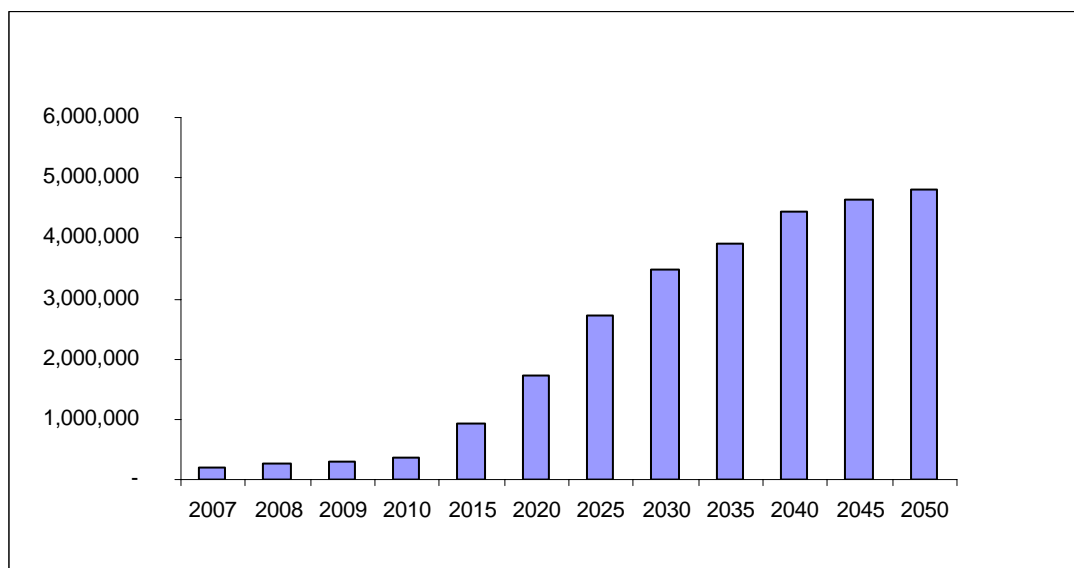


Figura 3 - Produção Global de Energia Eólica (GWh) para 2007-2050
Fonte: Cenário Moderado, GWEC, 2009

O que diz respeito a produção global de energia eólica prevê-se 4.818,6 TWh, ou seja 4.818.600 GWh, incluindo o repowering nos parques eólicos já em funcionamento.

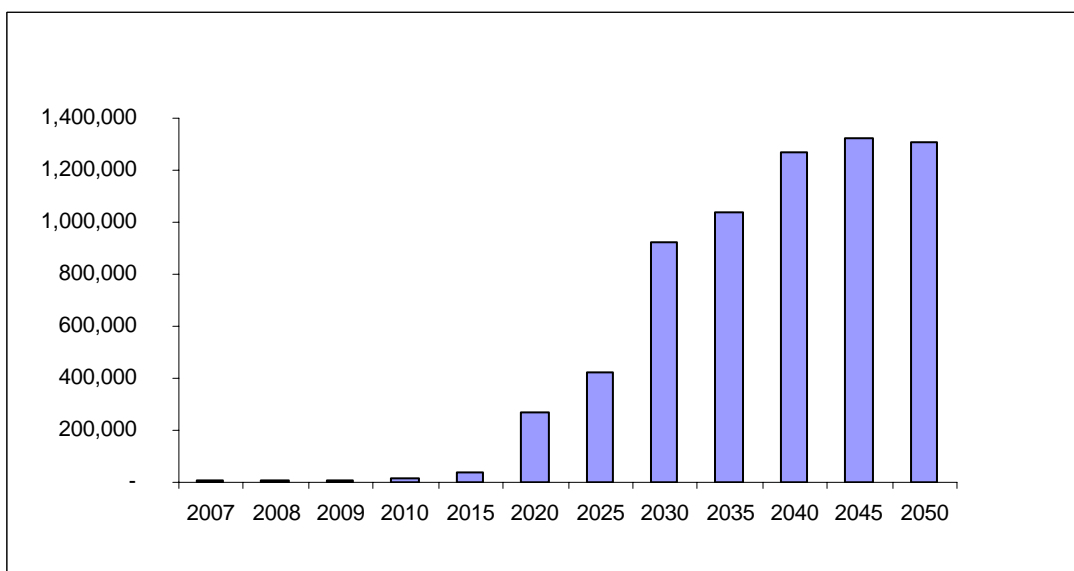


Figura 4 - Consumo Global de Energia Eólica (GWh) para 2007-2050
Fonte: Cenário Moderado, GWEC, 2009

O consumo de energia eólica tende a aumentar, principalmente depois de 2015 em função das políticas governamentais a nível global de incentivo ao consumo de energias renováveis.

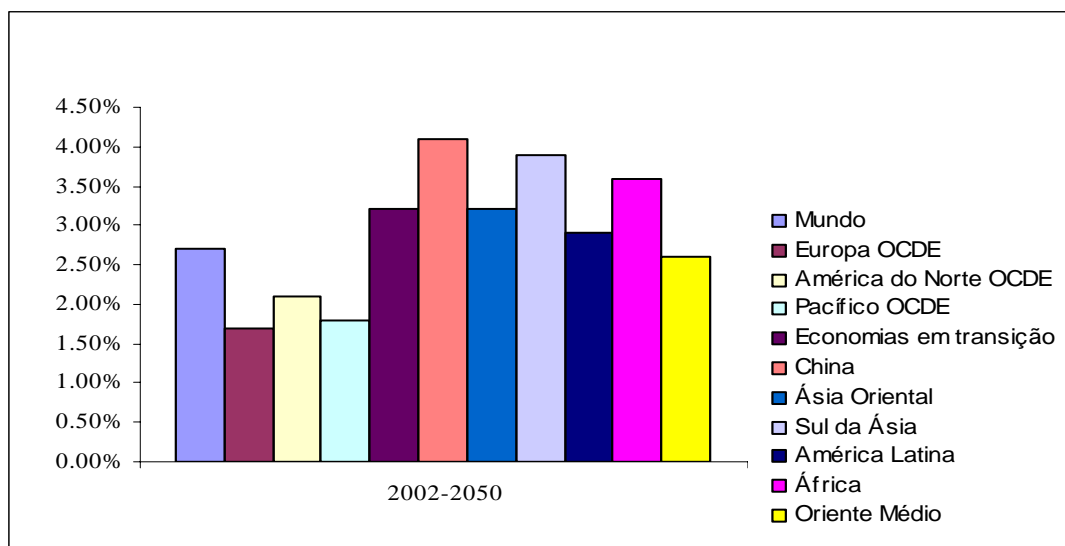


Figura 5 – Taxa de Crescimento do PIB Global para 2002-2050
Fonte: Crescimento do PIB mundial por regiões, AIE, 2009

Quanto à média global de crescimento do Produto Interno Bruto, espera-se um crescimento de 2,7% (2002 a 2050), ou seja, 0,1% ao ano.

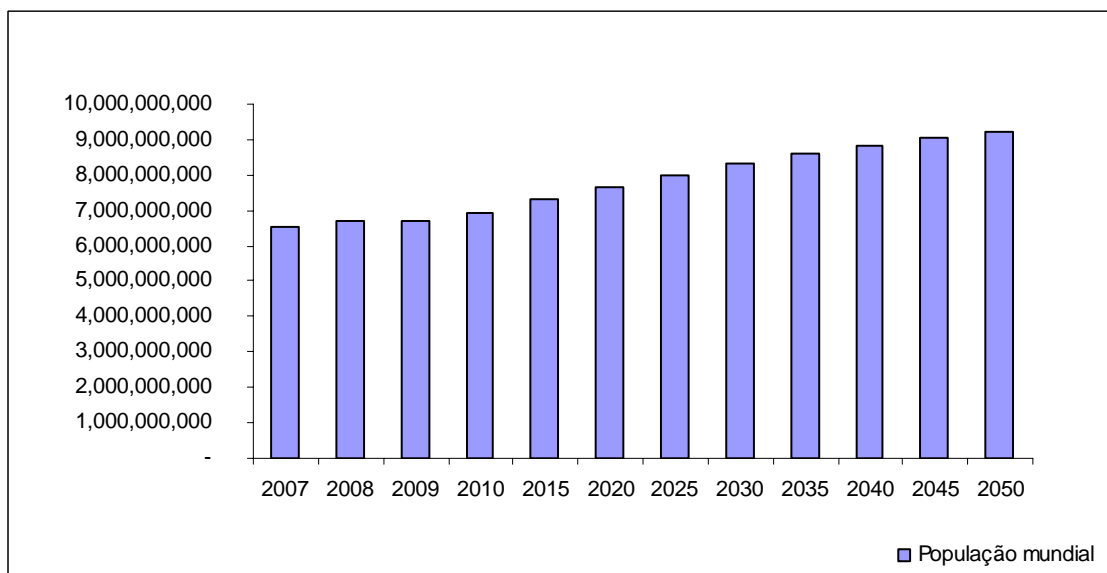


Figura 6 – Crescimento da População Mundial para 2007-2050
Fonte: ONU, 2007

A estimativa para a população mundial é 9 mil milhões de pessoas, considerando a taxa de crescimento de 41% (2007 a 2050), segundo previsão no documento *Perspectivas de População Mundial* das Nações Unidas.

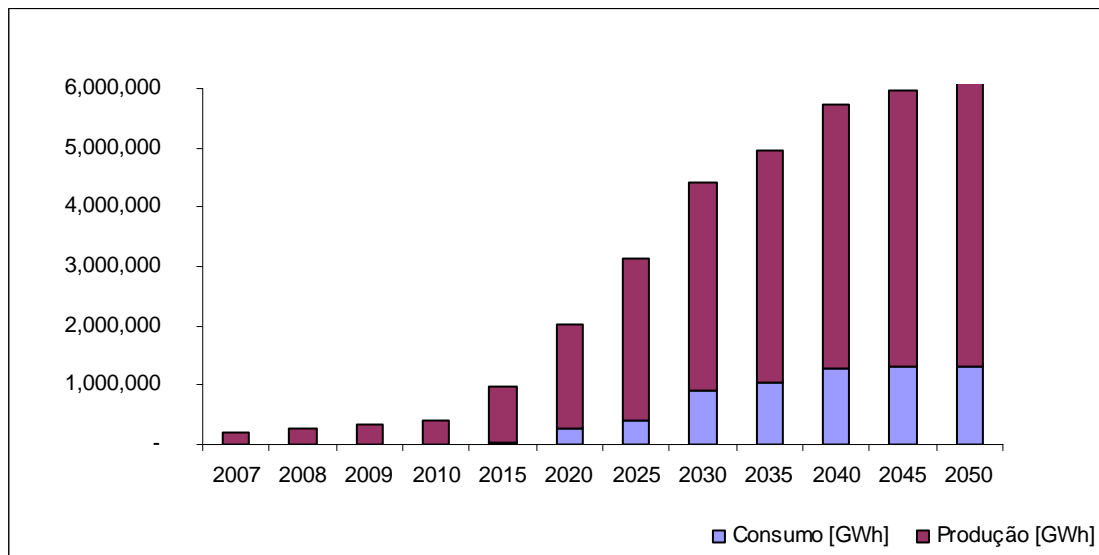


Figura 7 – Cenário Global de Energia Eólica (GWh) para 2007-2050

Fonte: Cenário Moderado, GWEC, 2009

O factor de capacidade na energia eólica refere-se ao percentual da capacidade nominal de uma turbine instalada numa particular localização que realmente funciona ao longo de um ano de produção. Esta primeira medida é tirada em cada localização de parque eólico, mas também é afectado pela eficiência de uma turbine para aquela localização. (Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L, 2002). Todos os cenários alternativos serão projectados considerando o factor de capacidade sugerido para 2007-2050, conforme Figura 8.

Figura 8 – Factor de Capacidade (%) para 2007-2050

Year	Cumulative [GW]	Global Annual Growth Rate [%] - excluding repowering	Annual Installation incl. Repowering	Capacity factor [%]	Production [TWh]	Wind power penetration of world's electricity in % - Reference	Wind power penetration of world's electricity in % - Efficiency	CO ₂ reduction (with 600gCO ₂ /kWh) [annual Mio tCO ₂]
2007	94	28	19,865	25	205.6	1.4	1.4	123
2008	118	27	23,871	25	257.8			155
2009	143	20	25,641	25	314.0			188
2010	172	19	28,904	25	377.3	2.1	2.1	226
2015	379	15	54,023	28	929.5			558
2020	709	11	81,546	28	1,739.8	7.3	8.2	1,044
2025	1,104	7	81,610	28	2,707.2			1,624
2030	1,420	3	80,536	28	3,484.0	11.9	14.6	2,090
2035	1,599	1	84,465	28	3,922.1			2,353
2040	1,696	1	97,548	30	4,457.3	12.5	16	2,674
2045	1,769	1	100,380	30	4,648.5			2,789
2050	1,834	1	100,302	30	4,818.6	11.2	16	2,891

Fonte: Cenário Moderado, GWEC, 2009



CENÁRIO ALTERNATIVO 1: Cenário “C₁”

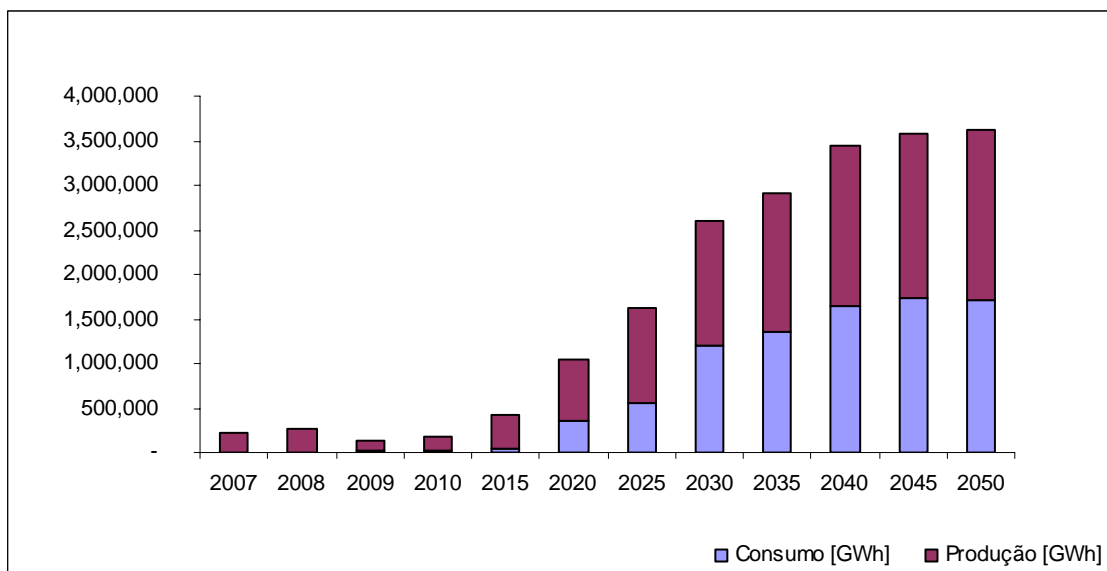


Figura 9 – Cenário (“C₁”) Global de Energia Eólica (GWh) para 2007-2050

Fonte: Autores

Tabela 5 – Resultados do Cenário “C₁” em 2050

Ano	Produção [GWh] (a)	Consumo [GWh] (b)	(b)/(a) [%]
2007*	205,600	5,757	2.8%
2008*	257,800	7,218	2.8%
2009	125,600	11,430	9.1%
2010	150,920	20,601	13.7%
2015	371,800	50,751	13.7%
2020	695,920	350,570	50.4%
2025	1,082,880	545,501	50.4%
2030	1,393,600	1,200,238	86.1%
2035	1,568,840	1,351,163	86.1%
2040	1,782,920	1,651,430	92.6%
2045	1,859,400	1,722,269	92.6%
2050	1,927,440	1,703,857	88.4%

* Não sofreram alterações por já serem dados oficiais publicados.

Fonte: Autores

Conforme projecção mostrada na Tabela 5, a partir de 2030 a produção e consumo globais de energia eólica tendem a se equilibrarem. No ano 2050 alcançará 88,4% de toda a produção de energia eólica gerada.



CENÁRIO ALTERNATIVO 2: Cenário “C₂”

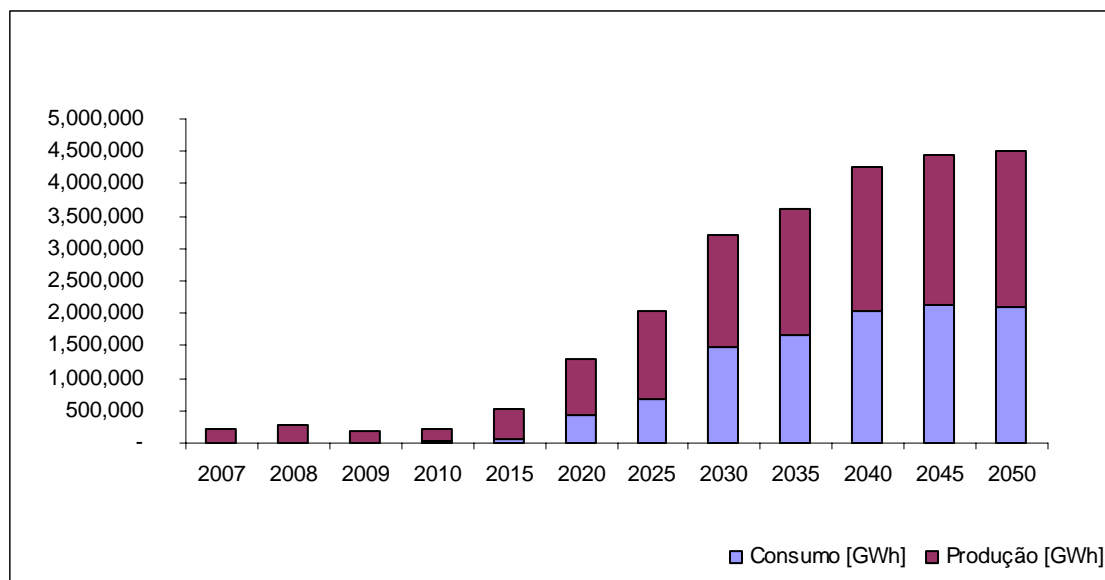


Figura 10 – Cenário (“C₂”) Global de Energia Eólica (GWh) para 2007-2050

Fonte: Autores

Tabela 6 – Resultados do Cenário “C₂” em 2050

Ano	Produção [GWh] (a)	Consumo [GWh] (b)	(b)/(a) [%]
2007*	205,600	5,757	2.8%
2008*	257,800	7,218	2.8%
2009	157,000	14,067	9.0%
2010	188,650	25,355	13.4%
2015	464,750	62,462	13.4%
2020	869,900	431,470	49.6%
2025	1,353,600	671,386	49.6%
2030	1,742,000	1,477,216	84.8%
2035	1,961,050	1,662,970	84.8%
2040	2,228,650	2,032,529	91.2%
2045	2,324,250	2,119,716	91.2%
2050	2,409,300	2,097,055	87.0%

* Não sofreram alterações por já serem dados oficiais publicados.

Fonte: Autores

Conforme projecção mostrada na Tabela 6, a partir de 2040 a produção e consumo globais de energia eólica tendem a se equilibrarem. No ano 2050 alcançará 87% de toda a produção de energia eólica gerada.



CENÁRIO ALTERNATIVO 3: Cenário “C₃”

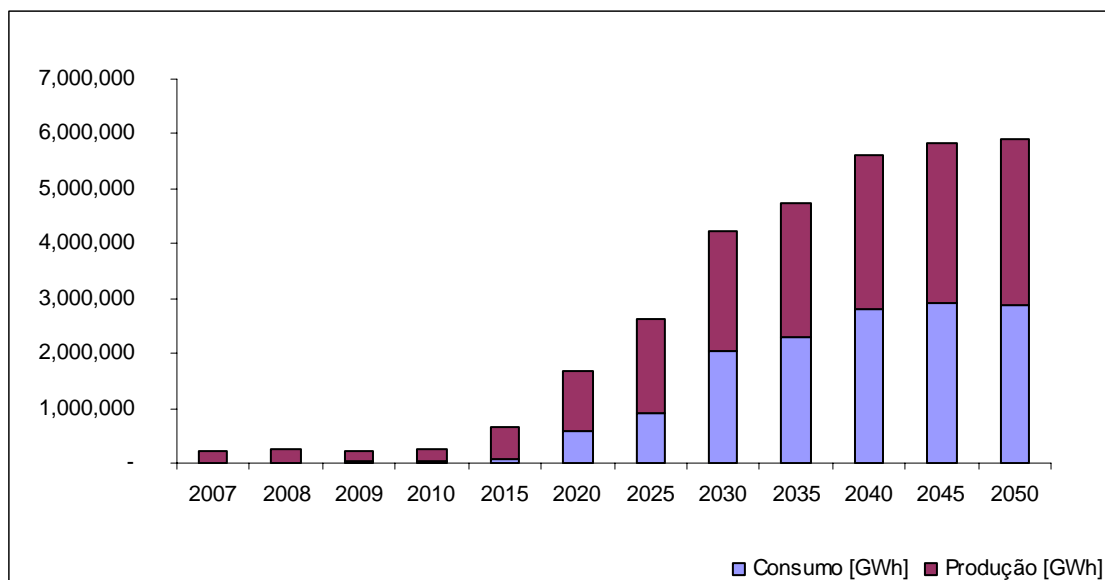


Figura 11 – Cenário (“C₃”) Global de Energia Eólica (GWh) para 2007-2050

Fonte: Autores

Tabela 7 – Resultados do Cenário “C₃” em 2050

Ano	Produção [GWh] (a)	Consumo [GWh] (b)	(b)/(a) [%]
2007*	205,600	5,757	2.8%
2008*	257,800	7,218	2.8%
2009	197,820	19,342	9.8%
2010	237,699	34,863	14.7%
2015	585,585	85,886	14.7%
2020	1,096,074	593,272	54.1%
2025	1,705,536	923,155	54.1%
2030	2,194,920	2,031,172	92.5%
2035	2,470,923	2,286,584	92.5%
2040	2,808,099	2,794,727	99.5%
2045	2,928,555	2,914,610	99.5%
2050	3,035,718	2,883,450	95.0%

* Não sofreram alterações por já serem dados oficiais publicados.

Fonte: Autores

Conforme projecção mostrada na Tabela 6, a partir de 2030 a produção e consumo globais de energia eólica tendem a se equilibrarem. No ano 2050 alcançará 95% de toda a produção de energia eólica gerada. Neste cenário pode-se dizer que o mercado eólico mundial estaria em equilíbrio económico.

5. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Atualmente, as fontes de energias renováveis fornecem 13% da demanda mundial de energia primária. Cerca de 80% do fornecimento de energia primária ainda vem dos combustíveis fósseis e os 7% restantes vêm da energia nuclear (AWEA, 2008). O *Cenário Alternativo 3 (C₃)* representa um padrão de desenvolvimento de transição da situação actual para um modelo sustentável de oferta de energia.

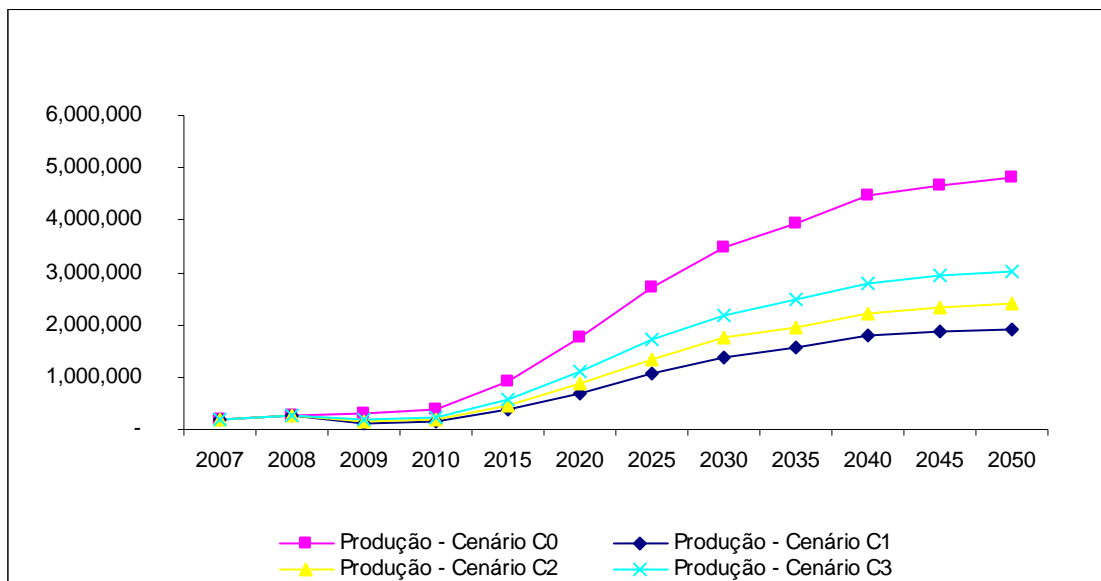


Figura 12 – Comparação da Produção de Energia Eólica (GWh) para 2007-2050. Fonte: Autores

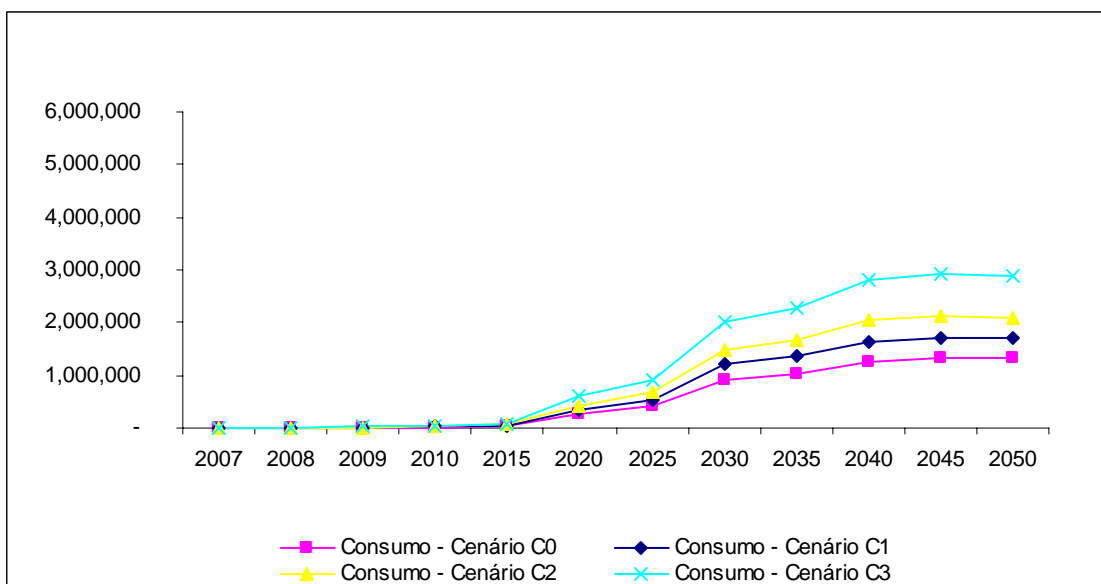


Figura 13 – Comparação do Consumo de Energia Eólica (GWh) para 2007-2050. Fonte: Autores

Ao compararmos os cenários alternativos (C_1 , C_2 e C_3) com o cenário de referência (C_0) da GWEC/IEA, conforme demonstrado nas Figuras 11 e 12 anteriores, se pode destacar os pontos relevantes:

1. A melhor política para a inserção das Energias Renováveis dar-se pelo lado da procura, pois os Cenário 2 e 3 são mais influenciados pelo aumento do consumo (60% e 120%, respectivamente).
2. Em termos de custos de oferta de energia, a tendência é de aumento contínuo para suprir uma demanda sempre crescente. Aumentar a eficiência energética e incrementar a oferta energética proveniente de fontes de energias renováveis resultará, no longo prazo, em uma redução nos dos custos da electricidade (AWEA, 2008).
3. Fica claro que planejar de acordo com metas ambientais rigorosas no setor energético também é uma opção bem sucedida do ponto de vista econômico.
4. A questão da segurança energética é uma prioridade a nível global. As preocupações concentram-se nos custos e na disponibilidade física de fornecimento. No momento, cerca de 80% da procura energética global é atendida por combustíveis fósseis (Flavin, 1999).
5. O crescimento da população mundial é uma forte variável que implica no aumento de energia útil. Estima-se que população mundial passe de 6,5 para 9,1 mil milhões de habitantes, ou seja, um crescimento de 40% para o período de 2007-2050.

Em uma época de liberalização em escala mundial dos mercados de electricidade, o aumento da competitividade das energias renováveis deve incrementar sua participação na geração de energia. Contudo, sem apoio político, a energia renovável permanece em desvantagem. As renováveis enfrentam uma cultura de distorções dos mercados mundiais de electricidade, instaurada por décadas de apoio financeiro, político e estrutural às tecnologias convencionais. O desenvolvimento das renováveis exige sérios esforços políticos e económicos, especialmente através de leis que garantam tarifas estáveis por um período maior do que 20 anos (BWEA, 2008).

Os novos geradores de energias renováveis competem com velhas usinas nucleares e de combustíveis fósseis, que produzem electricidade a custos baixos devido à depreciação dos parques energéticos e porque os consumidores e contribuintes já pagaram os juros

dos investimentos originais. A acção política se faz necessária para superar tais distorções, criando condições de mercado para as renováveis (Pires, 2004).

As actuais estruturas e barreiras políticas para as energias renováveis precisam ser ultrapassadas para destravar a exploração do grande potencial existente a ser explorado. Só assim estas fontes limpas e renováveis de energia poderão responder por uma parcela importante da oferta global de energia e contribuir para o crescimento económico sustentável, empregos de alta qualidade, desenvolvimento de tecnologia, competitividade global e liderança industrial e de pesquisas (Minister of Natural Resources Canada, 2005). Nenhuma fonte de energia eléctrica - convencional ou renovável – está totalmente livre de impactar o meio ambiente. No entanto, é preciso sempre buscar reduzir ou eliminar, se possível, os impactos causados pelas usinas eléctricas, para minimizar os danos causados à biosfera ou à atmosfera. Na maioria das vezes, o investimento em fontes renováveis de energia, pode contribuir para reduzir os impactos negativos ao meio ambiente, principalmente com relação a emissão de poluentes. (Hiester, 1981; Jenkins, N. Burton, T. Sharpe, D. Bossanyi, E., 2001).

No caso de geração de energia eólica, de maneira geral, podem ser citados como vantagens o reduzido impacto social e ambiental, que estes causam, seja ele físico, biótico, atóxico, social, ou relativo à emissão de Gases de Efeito Estufa; diversificação da matriz energética; a geração de empregos, principalmente em áreas rurais; possibilidade de plantação e criação de animais entre as turbinas; entre outros factores. Como impactos negativos podem ser considerados a ameaça aos pássaros, interferência electromagnética, desconforto nos olhos, sombras, impacto visual e sonoro, entre outros (CanWEA, 1996).

Os cenários energéticos aqui esboçados servem como base para entender as incertezas críticas da cadeia energética global, nas coisas que não sabe e que poderão transformar a sua actividade, e nos factores que se conhecem mas que poderão sofrer discontinuidades inesperadas face as decisões e directrizes tidas como “as melhores”. Os cenários ajudam a perceber as limitações dos nossos “saberes” do mundo, convidando-nos a pensar o impensável, a antecipar o desconhecido e a utilizar ambos de forma a tomar melhores decisões estratégicas face as nossas necessidades energéticas.

REFERÊNCIAS

- Alexandre, J. P. (2001). Energia Eólica: Evolução e Perspectivas Globais. Disponível em <http://br.geocities.com/aljappio/images/energiiaeolica.htm>. [Consultado em 19/11/2008]
- AWEA - American Wind Energy Association. (2008). Disponível em <http://www.awea.org>. [Consultado em 05/12/2008].
- BWEA - British Wind Energy Association. (2008). Disponível em <http://www.bwea.com/index.html>. [Consultado em 10/12/2008].
- CanWEA - Canadian Wind Energy Association. Wind Energy Basic Information, Backgrounder Published with Support from CANMET, 1996.
- Cordeiro, J. Sumário Executivo [R]evolução Energética, 2ª edição. (2008). Disponível em <http://www.greenpeace.org/brasil/documentos/energia/sumario-executivo-r-evolu-o>. [Consultado em 29/11/2008].
- DEWI. Deustches Windenergie - Institut Wilhelmshaven. (1998). Energia Eólica. Germany: Studio für Entwurf & Offset Druck.
- EUA, Departamento de Energia. (2008). Disponível em <http://www.eere.energy.gov>. [Consultado em 20/11/2008].
- EWEA - The European Wind Energy Association. In: Zervos, A., Kjaer, C. Pure Power: Wind Energy Scenarios up to 2030, Mar 2008, Brussels, 2008. Disponível em <http://www.ewea.org>. [Consultado em 13/06/2008].
- Flavin, C. (1999). Energia Eólica em rápida expansão In Brown, L. R. Estado do Mundo 1999. Salvador: UMA Editora. P. 59 a 61.
- Gasch Robert. (1982). Wind Turbine Generators. USA: MIT Press.
- Gipe, P. (1998). Wind Energy, Comes of Age.
- GWEC – Global Wind Energy Council. In: Sawyer, S. Global Wind 2007 Report, Second Edition, May 2008, Belgium, 2008. Disponível em <http://www.gwec.net>. [Consultado em 28/11/2008].
- Heier, S. (1998). Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, Wiley, John & Sons.
- Hiester, T.R. and Pennell, W.T. (1981). The Siting Handbook for Large Wind Energy Systems. WindBooks, New York, NY, USA.
- IEA – International Energy Agency. World Energy Outlook 2008: Executive Summary. (2008). Disponível em <http://www.iea.org>. [Consultado em 19/11/2008].
- Jenkins, N. Burton, T. Sharpe, D. Bossanyi, E. (2001). Handbook of Wind Energy, Wiley, John & Sons.
- Manwell, J. F., MCGowan, J. G., Rogers, A. L. (2002). Wind Energy Explained, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Minister of Natural Resources Canada. (2005). Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering & Cases Texbook. RETScreen® International Clean Energy Decision Support Centre. Canada.
- Monteiro, C. (1998). Energia Eólica. Disponível em <http://power.inescn.pt/claudio/eolica.html>. [Consultado em 15/10/2008].
- Nakicenovic, N. et al: “Global Energy Perspectives”, Cambridge, UK; Cambridge University Press, 1998.
- Pires, I. (2004). Aproveitando a Força dos Ventos. Disponível em <http://www.cos.ufrj.br/wind/news>. [Consultado em 21/02/2008].
- Snel, H. (1998). Review of the Present Status of Rotor Aerodynamics. Wind Energy, UK, 1998.
- SunMedia GmbH. (1999). Wind Turbine Market: Types, Technical Characteristics. Prices.

- Vesterdal, J. (1992). The Potential of Wind Farms. ELSAM, 1992.
- Walker John F. (1997). Jenkins Nicholas: Wind Energy Technology. Chichester, UK, Wiley, 1997.
- Wind Power Monthly. (2001). The Windicator - Operational Wind Power Capacity Worldwide.