

# Evolução histórica, desenvolvimento atual e potencial futuro das torres de concreto pré-moldado para suporte de aerogeradores

---

CARLOS CHASTRE – PROFESSOR DOUTOR  
VÁLTER LÚCIO – PROFESSOR DOUTOR  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA, PORTUGAL

---

## 1. INTRODUÇÃO

O vento é causado por diferenças na pressão atmosférica, geradas pelo aquecimento desigual da superfície da Terra. A energia do vento é uma fonte renovável de energia e tem sido aproveitada desde tempos imemoriais para mover os barcos, moer os cereais, bombear água ou colocar maquinaria em funcionamento. Por volta de 5000 a.C., já havia barcos à vela no Rio Nilo e, durante os séculos XV e XVI, os portugueses navegaram ao redor do mundo, da Europa ao Brasil (1500), contornaram a África para chegar à Índia (1498) e ao Japão (1543), com a ajuda de vento (Figura 1).

Em 200 a.C., há registo de existirem moinhos simples de vento na China para bombagem de água e moinhos de vento de eixo vertical com velas para moer cereais na Pérsia e no Oriente Médio. Novas formas de usar a energia do vento foram-se espalhando pelo mundo. Por volta do século XI, no Oriente Médio, os moinhos de vento foram amplamente utilizados para a produção de alimentos e, certamente, os mercadores e os cruzados levaram esta ideia para a Europa (Figura 2). Os holandeses redesenharam os moinhos de vento e adaptaram-nos para drenar lagos e pântanos no delta do rio Reno (Figura 3).

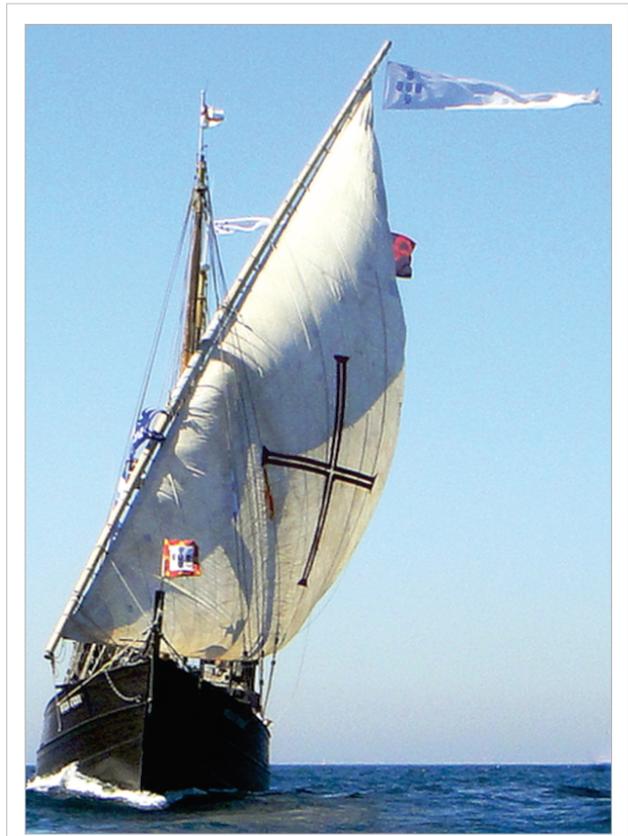


Figura 1 – Réplica da caravela Vera Cruz  
(fonte: NRP Sagres)



a Referido em manuscrito medieval, datado de 1340



b Pintura medieval holandesa

Figura 2 – Moinhos de vento

Os colonizadores levaram esta tecnologia para o Novo Mundo e, no final do século XIX, começaram a usar moinhos de vento para bombear água para fazendas e ranchos (Figura 4) e, posteriormente, para gerar eletricidade para residências e indústrias.

A industrialização, primeiro na Europa e depois nos Estados Unidos, levou a um declínio gradual no uso de moinhos de vento. Na Europa, os motores a vapor substituíram os moinhos de vento para bombear água.

Na década de 1930, os programas de eletrificação rural levaram a energia elétrica de baixo custo para a maioria das áreas rurais nos Estados Unidos. No entanto, a industrialização também provocou o desenvolvimento de grandes moinhos de vento para gerar eletricidade. Os pri-

meiros aerogeradores apareceram na Dinamarca por volta de 1890.

A popularidade da energia eólica tem oscilado com o preço dos combustíveis fósseis. Quando o preço dos combustíveis caiu após a Segunda Guerra Mundial, o interesse nos aerogeradores diminuiu. Mas, quando o preço do petróleo disparou em 1970, o interesse mundial nos geradores de turbinas eólicas aumentou significativamente. A seguir ao embargo do petróleo na década de 1970, a investigação e desenvolvimento em aerogeradores permitiram refinar velhas ideias e introduzir novas formas de converter energia eólica em energia útil. Muitas dessas abordagens têm sido demonstradas em parques eólicos em *onshore* e *offshore* em todo o mundo (Figura 5).



a Holanda



b Warwickshire, Inglaterra

Figura 3 – Moinhos de vento na Europa (Wikimedia commons)

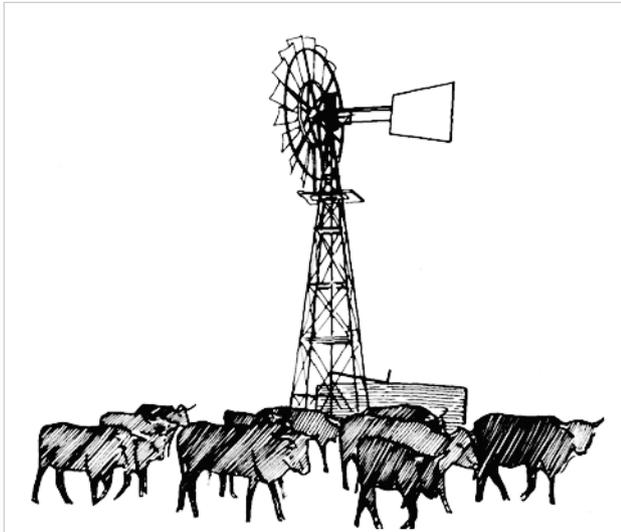


Figura 4 – Moinho de vento para bombear água

## 2. O MERCADO ATUAL DA ENERGIA EÓLICA

Hoje em dia, com a experiência de mais de duas décadas de exploração de parques eólicos, juntamente com a investigação e desenvolvimento no setor, o custo da eletricidade gerada pelo vento é muito próximo do custo de produção da energia convencional. A energia eólica é a fonte de energia que mais cresceu no mundo, proporcionando à indústria, ao comércio e às residências, energia limpa e renovável. Como exemplo, veja-se o caso português, em que o vento já é a fonte de cerca de 40% da energia consumida, e as energias renováveis (incluindo a energia eólica e hidráulica) foram cerca de 60% da energia elétrica consumida em dezembro de 2013 (Figura 6).

A evolução da capacidade de produção de energia eólica no mundo é altamente positiva (Figura 7). Em 2012, o aumento foi de cerca de 19% em relação a 2011 [02]. Os

10 países que mais contribuíram para o aumento mundial da capacidade de produção de energia eólica (Figura 8) são responsáveis por 85% desse aumento [02].

O crescimento mais significativo de 2012 ocorreu na América Latina, nomeadamente no Brasil, onde houve um aumento de 1.1GW de nova capacidade de potência instalada [02]. Este aumento é uma resposta ao crescimento da procura de energia elétrica, devido ao atual crescimento econômico do Brasil. No entanto, este aumento não foi suficiente para colocar o Brasil no clube “top dez” em 2013.

Tendo em conta esta tendência, a energia eólica poderá ser uma área promissora de negócios no que diz respeito à construção de torres em concreto pré-moldado para suporte de aerogeradores.

## 3. O POTENCIAL DA ENERGIA EÓLICA NO MUNDO E NO BRASIL

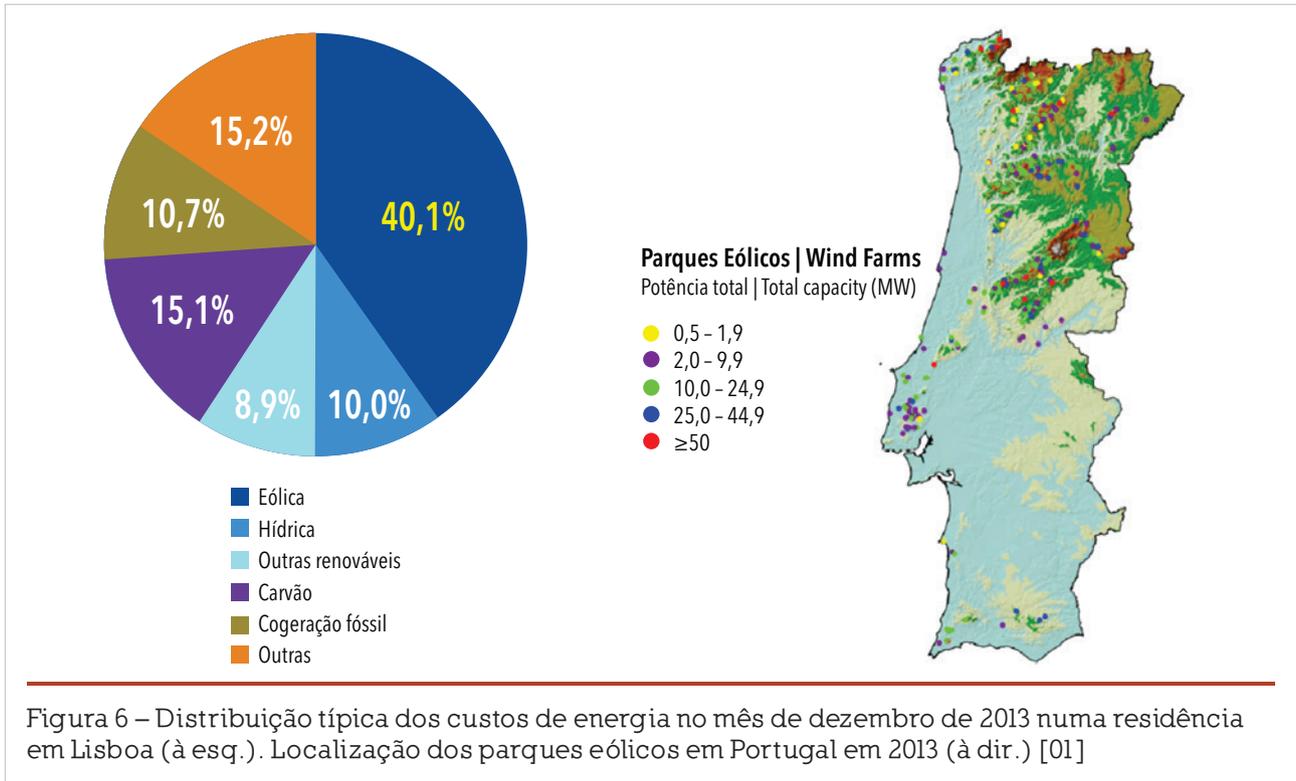
Em termos globais existem algumas informações baseadas em dados de satélite da NASA (SWERA - Solar and Wind Energy Resource Assessment) que permitem, de uma forma aproximada, estimar e classificar o potencial da energia eólica no mundo. Esta classificação de 1 a 7, apresentada pela SWERA, está representada na Figura 9 e permite identificar algumas das zonas mais interessantes para aproveitamento do potencial da energia eólica a 50 m de altura.

A título de exemplo, apresentam-se, na Figura 10, as estimativas dos ventos oceânicos em 1/1/2011 e 25/6/2011 baseadas em dados recolhidos pelo satélite NASA QuikSCAT (Remote Sensing Systems - Estimativas dos ventos oceânicos em 1/1/2011 e 25/6/2011 baseados em dados recolhidos pelo satélite NASA QuikSCAT.).

Diversos estudos consultados [03, 04] apontam que o potencial eólico brasileiro se situa acima de 60 Gigawatts. Os primeiros estudos foram realizados na região Nordeste (Ceará



Figura 5 – Parque eólico na serra da Lousã, Portugal (Wikimedia commons)



e Pernambuco), com o apoio de diversas entidades brasileiras (ANEEL, MCT e da CBEE da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE), que publicou em 1998 a 1ª edição do Atlas Eólico da Região Nordeste. A continuidade desse trabalho resultou no Panorama do Potencial Eólico no Brasil, representado na Figura 11 [04]. O Centro de Referência para Energia Solar e Eólica – CRESESB/CEPEL publicou um estudo, em 2001, [03] que estima o potencial eólico brasileiro na ordem de 143 Gigawatts.

Os dados apresentados na Figura 11 são retirados do Atlas de Energia Eólica do Brasil [04] e referem-se à velocidade média do vento e energia eólica média a uma altura

de 50m acima da superfície para 5 condições topográficas distintas, definidas como: zona costeira – áreas de praia, normalmente com larga faixa de areia, onde o vento incide predominantemente do sentido mar-terra; campo aberto – áreas planas de pastagens, plantações e /ou vegetação baixa, sem muitas árvores altas; mata – áreas de vegetação nativa, com arbustos e árvores altas, mas de baixa densidade

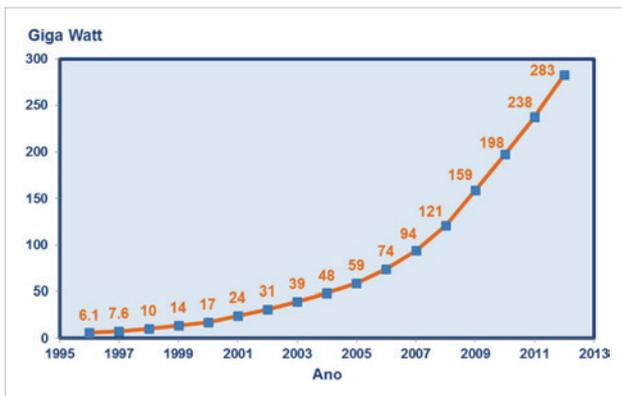


Figura 7 – Capacidade mundial de produção de energia eólica, 1996-2012 (adaptado de [02])

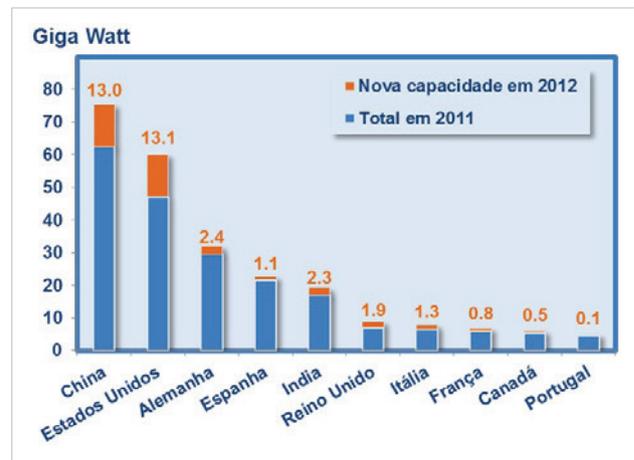


Figura 8 – Os 10 países que mais contribuíram para o aumento mundial da capacidade de produção de energia eólica, capacidade de energia eólica em 2011 e nova capacidade em 2012 (adaptado de [02])

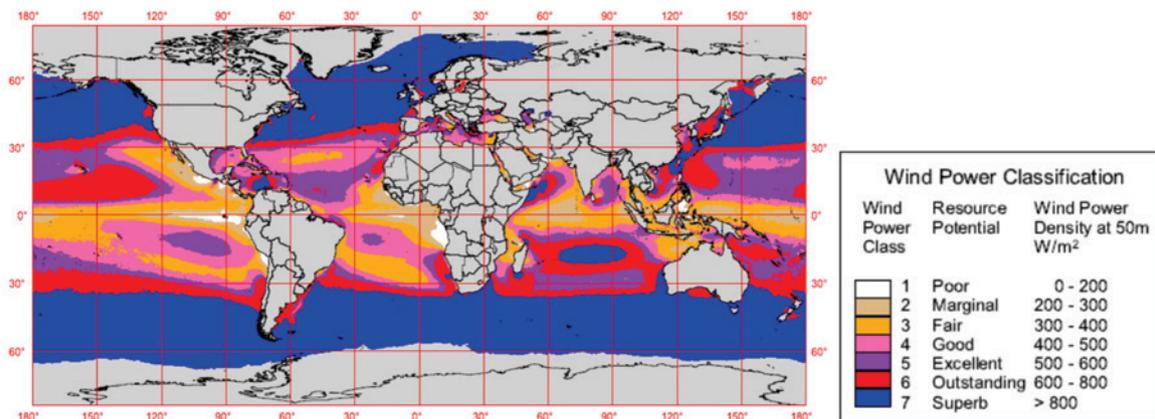


Figura 9 – Classificação do potencial de energia eólica no mundo de acordo com SWERA

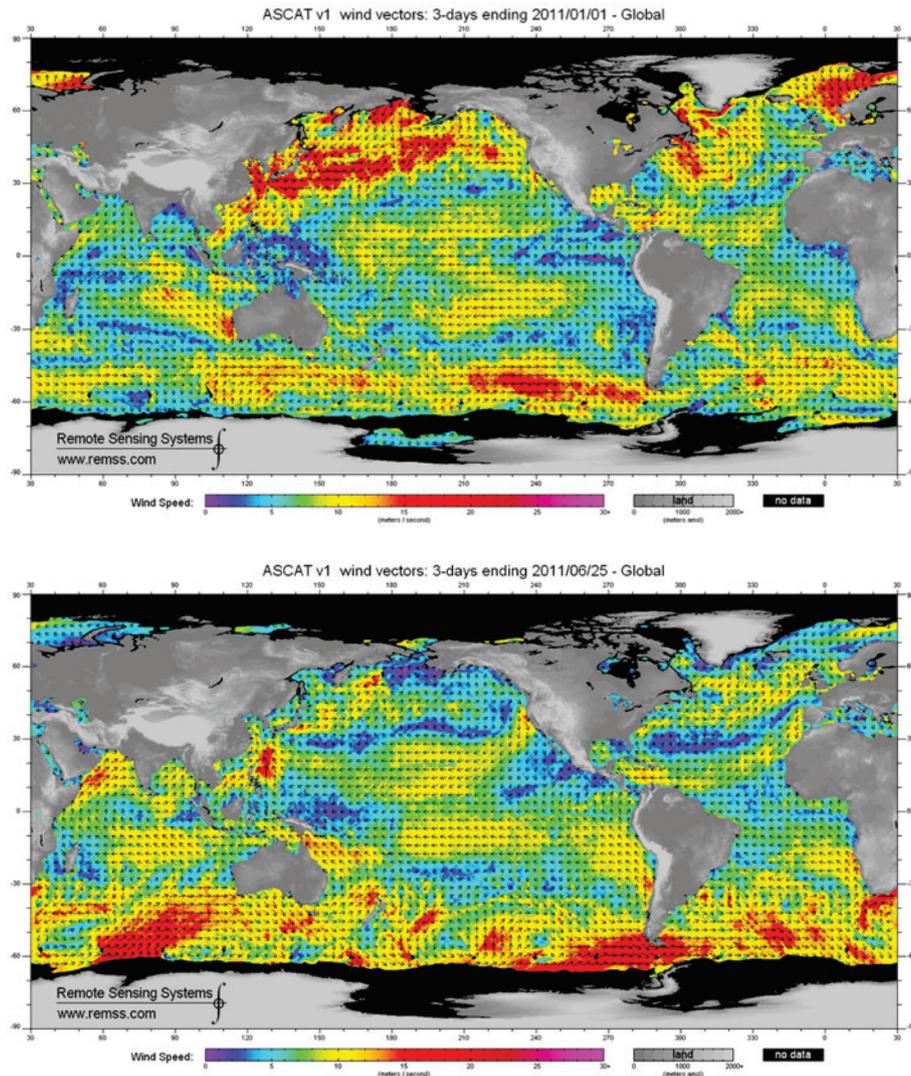


Figura 10 – Estimativas dos ventos oceânicos em 1/1/2011 e 25/6/2011, satélite NASA QuikSCAT

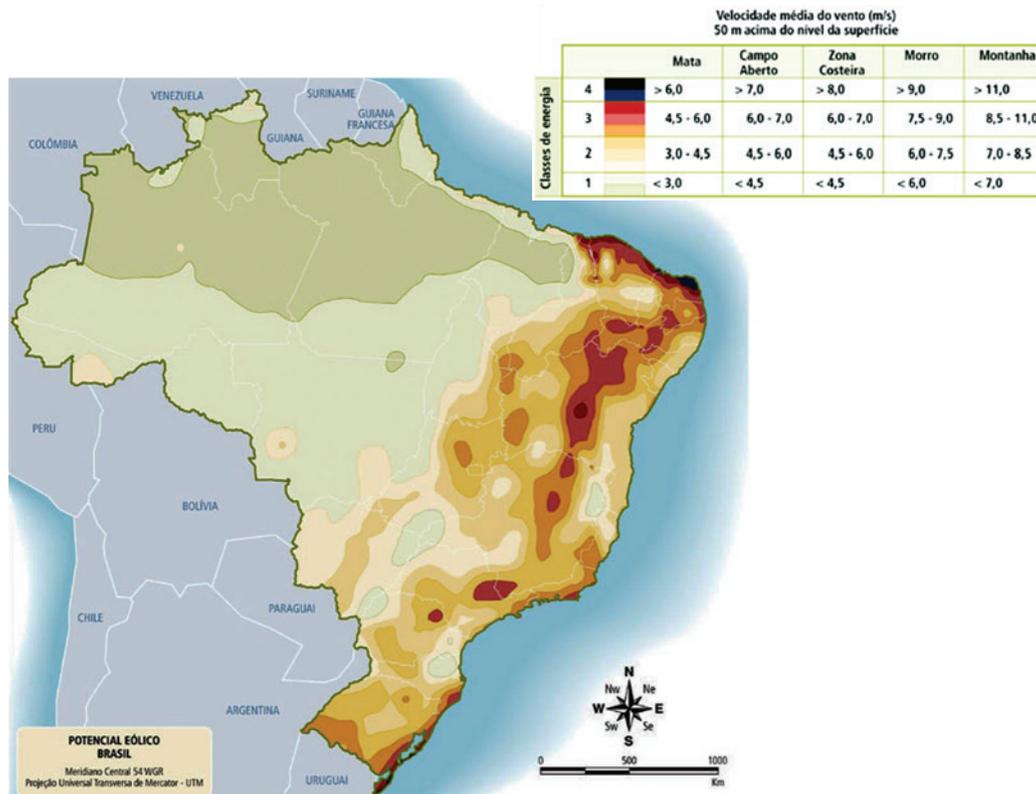


Figura 11 – Velocidade anual média do vento a 50m de altura [04]

de, tipo de terreno que causa mais obstruções ao fluxo de vento; morro - áreas de relevo levemente ondulado, relativamente complexo, com pouca vegetação ou pasto; montanha - áreas de relevo complexo com altas montanhas.

Observando o quadro da Figura 11, verifica-se que as zonas classificadas como de classe 1 são regiões que apresentam um baixo potencial eólico, enquanto as zonas de classe 4 correspondem às zonas com melhores locais para aproveitamento do potencial eólico no Brasil.

#### 4. SOLUÇÕES ESTRUTURAIS PARA SUPORTE DE AEROGERADORES

Ao longo dos tempos, os moinhos de vento começaram por ser construídos em madeira ou em alvenaria de pedra (Figuras 2 e 3); com a revolução industrial, apareceram as primeiras estruturas treliçadas metálicas (Figura 4); e, só no século XXI, o concreto armado aparece como material alternativo às torres de aço. Durante o século XX, foram propostas diversas soluções estruturais e métodos construtivos para torres, de modo a suportar geradores eólicos a grande altura. São soluções correntes os mastros espia-dos, cascas metálicas, estruturas com perfis de aço, torres com estruturas em parede de concreto betonada no local ou pré-moldada, torres híbridas de concreto e cascas metálicas, até torres com materiais compósitos.

As principais ações a considerar na estrutura são: i) as forças do vento nas pás da turbina e na própria estrutura; ii) o peso da turbina e o peso próprio da estrutura; iii) os efeitos dinâmicos do vento e dos equipamentos; iv) as ações sísmicas; e v) o efeito das correntes e das marés, no caso de estruturas *offshore*.

As fundações, normalmente de grandes dimensões, dependem obviamente do local onde se pretende implementar o parque eólico. Se for em *onshore*, podem-se ter fundações como as mostradas na Figura 12, para o caso de torres com a estrutura tubular e, de menores dimensões, por poderem ser individuais, no caso de se tratar de estruturas treliçadas.



Figura 12 – Fundações (*onshore*) de grandes dimensões sobre as quais será colocado a torre tubular para suportar o aerogerador



Figura 13 – Fundações flutuante da EDP a utilizar em águas profundas

Atualmente, as soluções existentes para *offshore* são bastante dispendiosas e dividem-se entre as flutuantes, utilizadas em águas profundas (Figura 13), e as utilizadas em águas pouco profundas e que funcionam por gravidade, como as fundações em caixão ou as fundações em cálice pré-moldado em concreto (Figura 14). Existem outras soluções, como as que recorrem a estacas, as que têm forma de tripé ou as treliçadas.

Para o suporte de geradores eólicos, têm sido utilizadas, em especial, as torres em aço com anéis cilíndricos ou tronco-cônicos, montados no local e fixados à fundação de concreto armado através de chumbadores e, entre si, através de parafusos.

As expectativas para o futuro da energia eólica passam pelo desenvolvimento de turbinas cada vez mais potentes (superiores a 6MW), com o conseqüente aumento da altura das



Figura 14 – Fundação de gravidade em concreto pré-moldado para águas pouco profundas. A torre é montada no topo [05]

torres. A evolução nos últimos anos da potência das turbinas, com o inerente aumento do diâmetro das pás, tem levado a um aumento significativo da altura das torres. Na Figura 15, pode-se constatar que, em 1990, as turbinas permitiam produzir 500kW, com um diâmetro das pás de 40m e uma altura das torres de 54m; em 2000, a capacidade das turbinas alcançou os 2000kW, com um diâmetro das pás de 80m, atingindo-se, em 2005, turbinas com 5MW para um diâmetro das pás de 124m e uma altura das torres de 114m [06].

A necessidade de aumentar a altura das torres, com o conseqüente aumento do diâmetro e da espessura das paredes, assim como da quantidade de aço, tem encontrado crescentes limitações à utilização das torres em aço, quer pelo custo do aço, cujo preço tem grandes flutuações no mercado, quer pelas limitações de produção e transporte (ver Figura 16) relacionados com o tamanho dos anéis necessários nas torres com altura superior a oitenta metros.

Face a estes novos limites, algumas das características das torres em aço perdem as vantagens referidas, designadamente: o diâmetro máximo da base da torre, por questões de transporte, não pode exceder os 4,30 metros, o que representa um obstáculo insuperável para o aumento da altura da torre; com o aumento da altura da torre e face às limitações dimensionais referidas, as torres metálicas tornam-se estruturalmente mais sensíveis a fenómenos de fadiga, de instabilidade, de flexibilidade e de deficiente comportamento dinâmico para a ação do vento e para as ações dos sismos, por reduzida ductilidade do seu comportamento [07, 08], para além da exigência de fundações mais pesadas.

Apesar de terem evoluído para alturas ligeiramente superiores às torres de aço, as torres de concreto com

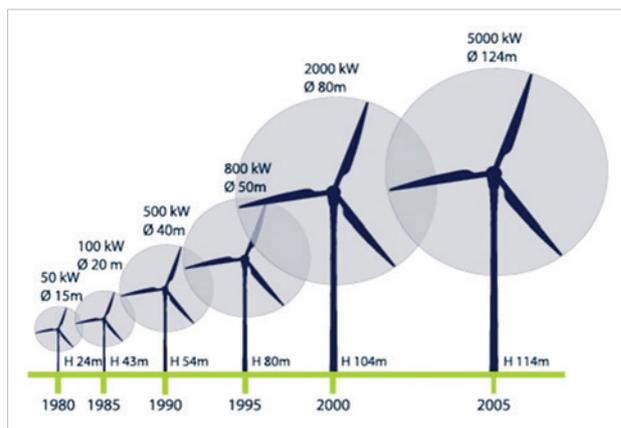


Figura 15 – Evolução da altura das torres com a potência das turbinas



Figura 16 – Transporte de uma torre de aço (à esquerda) para suporte de aerogeradores no parque de Scout Moor, na Inglaterra (à direita) [12]

anéis ou pré-moldadas continuam limitadas pelo diâmetro máximo da base da torre (Figura 17) e necessitam, para a sua montagem, de guias extremamente altas. As torres com paredes de concreto betonadas no local apresentam a desvantagem de o processo construtivo ser bastante demorado, situação que onera bastante o custo final da torre. Atendendo às expectativas futuras para o desenvolvimento da energia eólica em *onshore* e *offshore*, constata-se que o mercado necessita de torres eólicas cada vez maiores e que as soluções existentes no mercado não resolvem completamente esta necessidade.

Para responder a este importante nicho de mercado, concebeu-se uma torre treliçada pré-moldada em concreto armado (Figura 18) [09]. Esta solução de torre permite uma montagem rápida e de fácil transporte.

A torre treliçada é composta por elementos pré-molda-

dos e pretende ser uma solução alternativa para torres de mais de 80 m de altura e competitiva em termos económicos. As pequenas dimensões dos elementos pré-moldados não necessitam de transporte especial e proporcionam a liberdade de escolha da geometria da torre (diferente número de colunas e diferentes espaçamentos entre elas, etc.), com vista a otimizar a capacidade de carga e o controle da frequência natural de vibração. A solução apresenta também reduções no custo das fundações. Os autores submeteram uma patente em Portugal e no Brasil, e, em 2009, esta solução ganhou um Prêmio de Inovação BES.

## 5. TORRES PRÉ-MOLDADAS EM CONCRETO PARA SUPORTE DE GERADORES EÓLICOS

As torres construídas com concreto pré-moldado podem ser constituídas por:



Figura 17 – Torre em concreto pré-moldado para suporte de um aerogerador (à esquerda) (Wikimedia commons); Anéis pré-moldados típicos deste tipo de estrutura (à direita, fonte: ENERCON)



Figura 18 – Torre treliçada pré-moldada em concreto armado desenvolvida pelos autores para *onshore* (à esquerda) e *offshore* (à direita)

- i) anéis pré-moldados com juntas horizontais e, geralmente, protendidos verticalmente (Figuras 19 a 21);
- ii) meios anéis na base e anéis no topo, com juntas verticais e horizontais e, geralmente, protendidos verticalmente (Figuras 22 e 23);
- iii) aduelas planas nas faces laterais e curvas nos cantos, sendo a dimensão vertical dos elementos a mais longa, com protensão no interior (Figura 24);
- iv) estrutura treliçada de elementos pré-moldados e pré-esforçados ligados em conjunto (Figuras 18 e 25). Existem sistemas que utilizam meios anéis semi-



Figura 19 – Anéis pré-moldados com juntas horizontais (fonte: Enercon)

circulares na base das torres de grande diâmetro, no sentido de ter elementos pré-moldados menores para simplificar o transporte. Nas Figura 21 a Figura 23, mostram-se alguns pormenores de ligações entre os anéis, nas juntas verticais e horizontais, para estruturas tubulares pré-moldadas de concreto para suporte de geradores eólicos. Na Figura 24 mostra-se a torre híbrida em concreto pré-moldado e aço. Na Figura 18 mostra-se a torre treliçada pré-moldada em concreto armado para onshore e offshore e, na Figura 25, mostra-se um pormenor desta torre treliçada.

As soluções estruturais em concreto pré-moldado para suporte de aerogeradores têm vantagens indiscutíveis em relação às soluções de aço:

- Capacidade para atingir grandes alturas e suportar aerogeradores de grandes dimensões, quer onshore, quer offshore;
- Melhoria do comportamento dinâmico, reduzindo a fadiga, aumentando a vida útil do equipamento e reduzindo a manutenção;
- Ligações estruturais fiáveis, testadas, sem manutenção, proporcionando uma montagem rápida e as vantagens do monolitismo estrutural;
- Excelente resposta às ações sísmicas, graças à elevada ductilidade e amortecimento estrutural, contrastando com as torres de aço;
- Menor necessidade de manutenção em contraste com as torres aço, especialmente em ambiente offshore;
- Maior durabilidade destas estruturas de concreto



Figura 20 – Anéis pré-moldados de concreto com a porta na base da torre (fonte: Enercon)



Figura 21 – Ligações horizontais entre dois anéis pré-moldados de concreto (fonte: Enercon)

em relação às torres de aço, em particular em ambientes marinhos;

- Menor ruído gerado pelo efeito de amortecimento do concreto;
- Redução das emissões de CO<sub>2</sub> na fabricação da torre (entre 55 e 65% das emissões envolvidas na fabricação de uma torre de aço);
- O material das torres é totalmente reciclável;



Figura 22 – Anéis semicirculares pré-moldados em concreto na base da torre, com juntas verticais e horizontais



Figura 23 – Detalhe de uma junta vertical

- A durabilidade do concreto das torres é muito mais elevada que a dos aerogeradores (permitindo a futura substituição dos aerogeradores por outros de maior potência, multiplicando as possibilidades de amortização do custo da obra e da infraestrutura de transporte de energia, especialmente onerosa em *offshore*).

## 6. CONCLUSÕES

Os suportes dos geradores de energia eólica podem ser construídos com elementos de concreto pré-moldado com grandes vantagens em relação às soluções tradicionais, seja para parques eólicos *onshore* ou *offshore*.

As principais vantagens das torres de concreto pré-moldado, em relação às estruturas de aço tradicionais, são a capacidade de atingir maiores alturas, com



Figura 24 – Solução ATS - torre híbrida em concreto pré-moldado e aço (à esquerda) e montagem (à direita) [10, 11]

melhor comportamento dinâmico e fundações mais econômicas, bem como a menor necessidade de manutenção, especialmente em ambiente *offshore*.

O Brasil, através da ABCIC, está representado no grupo de trabalho 6.14 da fib (Federação Internacional do Concreto), cujo objetivo é a produção de um *bulletin* com o estado da arte sobre estruturas pré-moldadas de concreto para suporte de aerogeradores [13, 14]. No âmbito de um projeto de investigação sobre estruturas treliçadas em concreto pré-moldado para *onshore* e *offshore* [09, 12], em curso na Universidade NOVA de Lisboa, dois professores brasileiros, um da Universidade Federal Tecnológica do Paraná e um da Universidade Estadual de Londrina, estão a colaborar neste projeto na área de ligações estruturais de concreto pré-moldado e na modelação para *offshore* de estruturas de torres treliçadas de concreto, para suporte de aerogeradores.

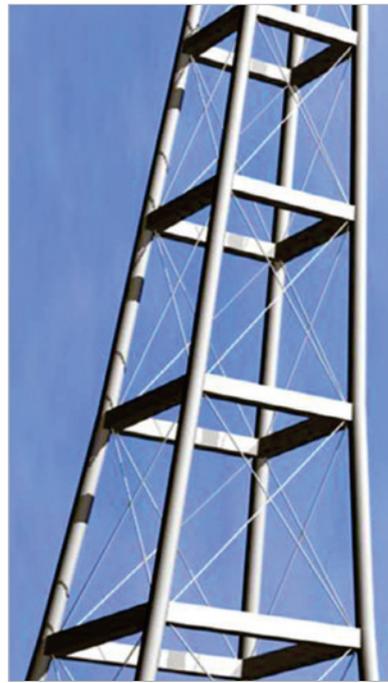


Figura 25 – Pormenor da torre treliçada de concreto pré-moldado [08]

## Referências Bibliográficas

- [01] Relatório INEGI. Parques Eólicos em Portugal. APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis Dezembro de 2013.
- [02] Renewables 2013 Global Status Report; REN 21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, June 2013; Paris; ISBN 978-3-9815934-0-2.
- [03] Odílon A. C. Amarante, Michael B. J. Zack, Antonio L. de Sá (2001). Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. CRESESB, Brasília.
- [04] Atlas de Energia Eólica no Brasil (2005). Agência Nacional de Energia Elétrica. 2. Ed – Brasília: ANEEL, 243p. ISBN: 85-87491-09-1.
- [05] Tricklebank, A. H. et al. (2007). Concrete towers for onshore and offshore wind farms - conceptual design studies, The Concrete Centre, UK.
- [06] Chastre, C., Lúcio, V., et al. (2012). Estruturas Pré-Moldadas no Mundo. Aplicações e Comportamento Estrutural, Fundação da Faculdade de Ciência e Tecnologias da Universidade NOVA de Lisboa, Brasil, 320p., ISBN: 978-989-97721-1-3
- [07] Chastre, C., and Lúcio, V. (2012). “Torres pré-fabricadas de betão para suporte de turbinas eólicas.” Estruturas Pré-moldadas no Mundo - Aplicações e Comportamento Estrutural, Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa, p.91-106.
- [08] Chastre, C., Lúcio, V. (2012). “Precast Towers for Wind Energy Generators - Design issues.” Precast Concrete Towers for Wind Energy Generators, Válter Lúcio, C. Chastre, R. Marreiros, A. Oliveira, and A. Machado, eds., Fundação da Faculdade de Ciência e Tecnologias da Universidade NOVA de Lisboa, p.62-92.
- [09] Chastre Rodrigues, C.; Da Guia Lúcio, V.; Truss Tower; WIPO - World Intellectual Property Organization, International Publication Number WO 2010/117289 A9; 2010.
- [10] Brughuis, F.; Advanced Tower Systems; PrecastWind 2012 - Precast Concrete Towers for Wind Energy Generators; Fundação da Faculdade Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA Lisboa, 2012; ISBN: 978-989-97721-4-4.
- [11] Lúcio, V., Chastre, C., Marreiros, R., Oliveira, A., and Machado, A. (2012). “Precast Concrete Towers for Wind Energy Generators.” Fundação da Faculdade de Ciência e Tecnologias da Universidade NOVA de Lisboa. 175p., ISBN: 978-989-97721-4-4.
- [12] Feliciano, Mícael. Estudo da implantação offshore de turbina eólica sobre torre treliçada em betão pré-esforçado. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Energias Renováveis Conversão Elétrica e Utilização Sustentável. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10362/11888>.
- [13] Lúcio, V., Chastre, C. (2014). “Precast concrete wind tower structures” CPI - Concrete Plant International, junho 2014, p.144-149.
- [14] Lúcio, V. , Chastre, C.; Precast Towers for Wind Turbines; International Concrete Conference & Exhibition - Latin America 2014, p.74-81, Florianópolis, Brasil, março 2014. ●