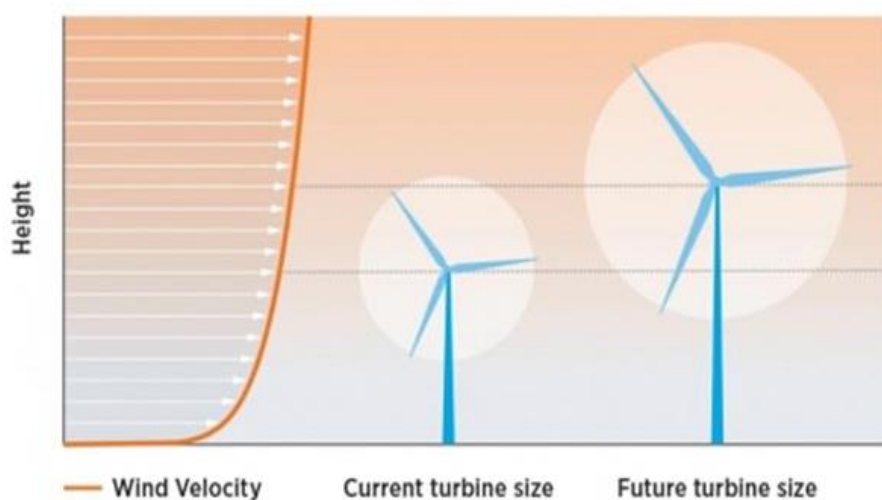


## Torres Eólicas: Aço x Concreto<sup>(1)</sup>

Mauro Iwanow Cianciarullo

A tecnologia eólica está atravessando uma interessante transformação. Cada vez maiores, os aerogeradores já são encontrados nos 12 MW de potência para o mercado offshore e estão alcançando 6 MW de potência no mercado onshore, isto decolou nos últimos 10 anos. Entretanto toda inovação traz desafios e o desafio da vez são as torres para elevar aerogeradores à altura de projeto.

Desenvolvendo um pouco mais o assunto para o mercado onshore, cabe aqui um entendimento a respeito do porque elevá-los. O vento apresenta uma conformação turbulenta próxima ao solo, principalmente se houver interferências, sejam árvores, construções ou variações do relevo que interfiram no fluxo do mesmo. Esta turbulência perde força com o aumento da altura. Assim vimos um fluxo de vento mais forte, uniforme e constante conforme mais distante do terreno.



Fonte: Wind Exchange

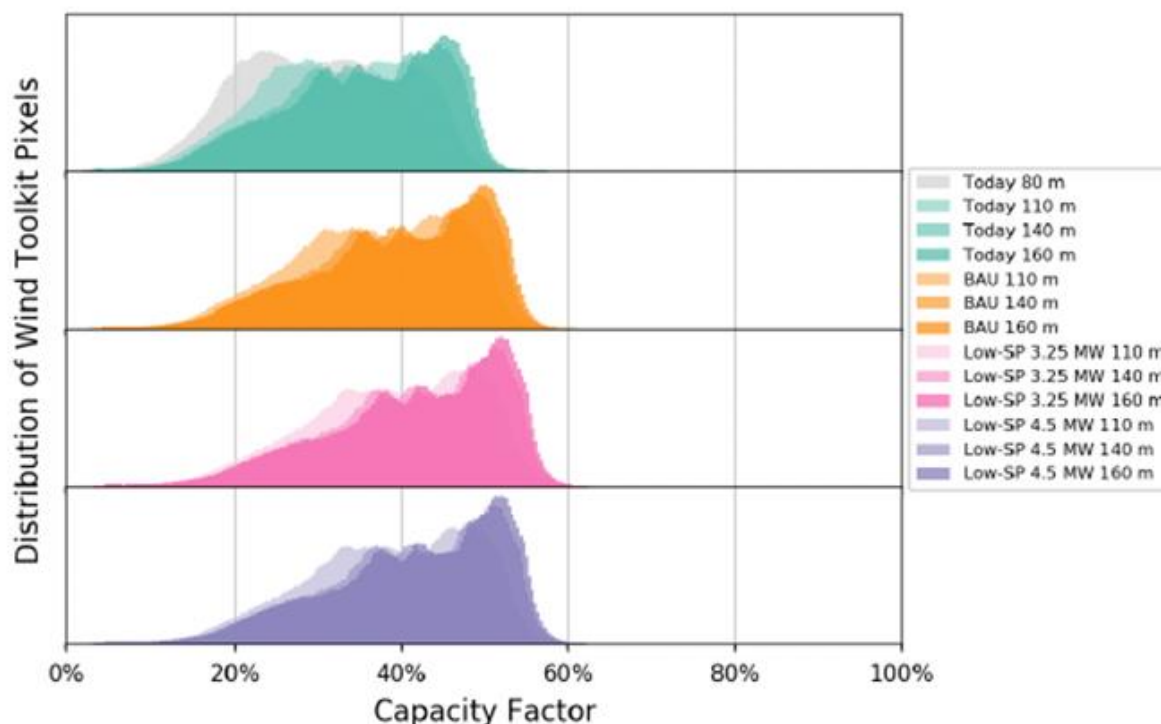
Torres mais altas e aerogeradores maiores geram mais energia, pois trabalham mais tempo pela potência nominal, portanto incorrendo em aumento da potência garantida, uma vez que ficam sujeitos a maior uniformidade de vento aumentando assim também o fator de capacidade do parque eólico e ampliando em até 12% a geração de energia por turbina instalada. Esta redução de turbulência proporciona também uma expectativa de vida útil maior com redução de custos de operação e manutenção. Com o fator de capacidade aumentado, o investidor pode ser mais competitivo nos leilões de energia.

Um estudo interessante do NREL (National Renewable Energy Laboratory) [1] dos Estados Unidos fez uma análise entre turbinas de diferentes potências e alturas e comprovou este aumento de capacidade com o aumento de altura em torno de 10% a 15%.

Para a tabela abaixo: Business as usual (BAU) – turbina esperada como média instalada por volta de 2030 nos EUA e Low specific power (Low-SP):

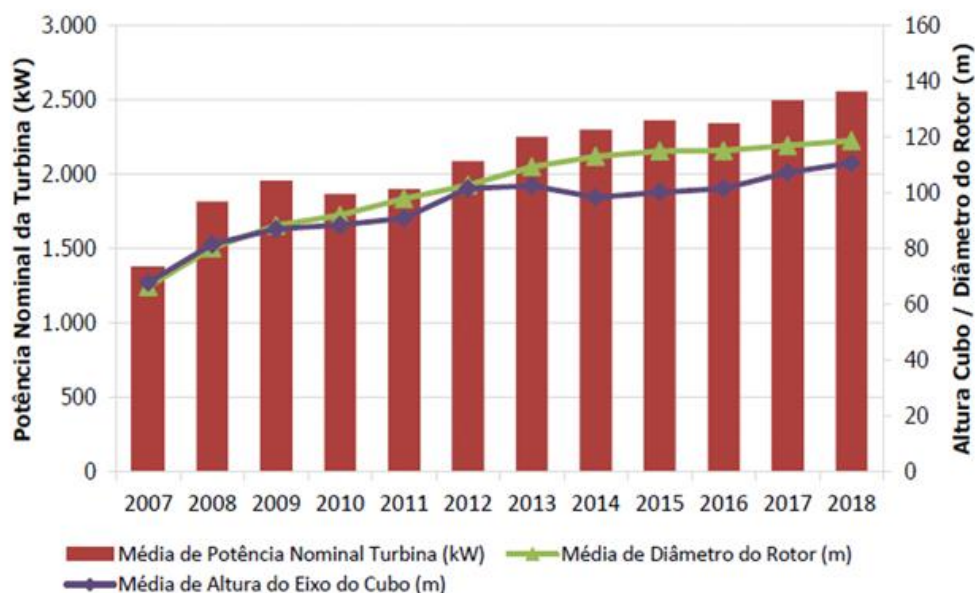
	Today	BAU	Low-SP 3.25 MW	Low-SP 4.5 MW
Nameplate Capacity (MW)	2.32	3.30	3.25	4.50
Rotor Diameter (m)	113	156	166	194
Specific Power (W/m <sup>2</sup> )	231	173	150	152

Configurações das Turbinas usadas para estimar o Fator de Capacidade com alturas dos Hubs. Fonte: NREL



Fator de Capacidade estimada com alturas dos Hubs. Fonte: NREL

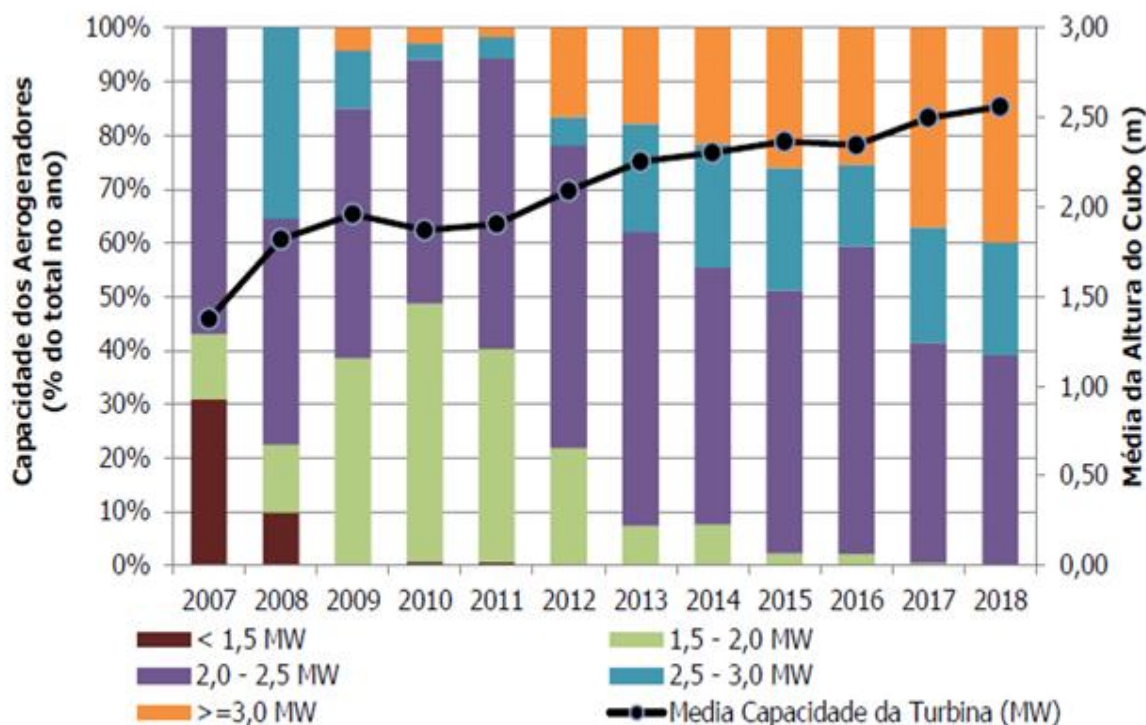
Até hoje, para se atingir alturas de projeto, as torres metálicas em 3 segmentos e diâmetro na base de até de 4,50 metros têm performedo, atendendo esta demanda média abaixo de 100 metros de altura para aerogeradores de até 3 MW.



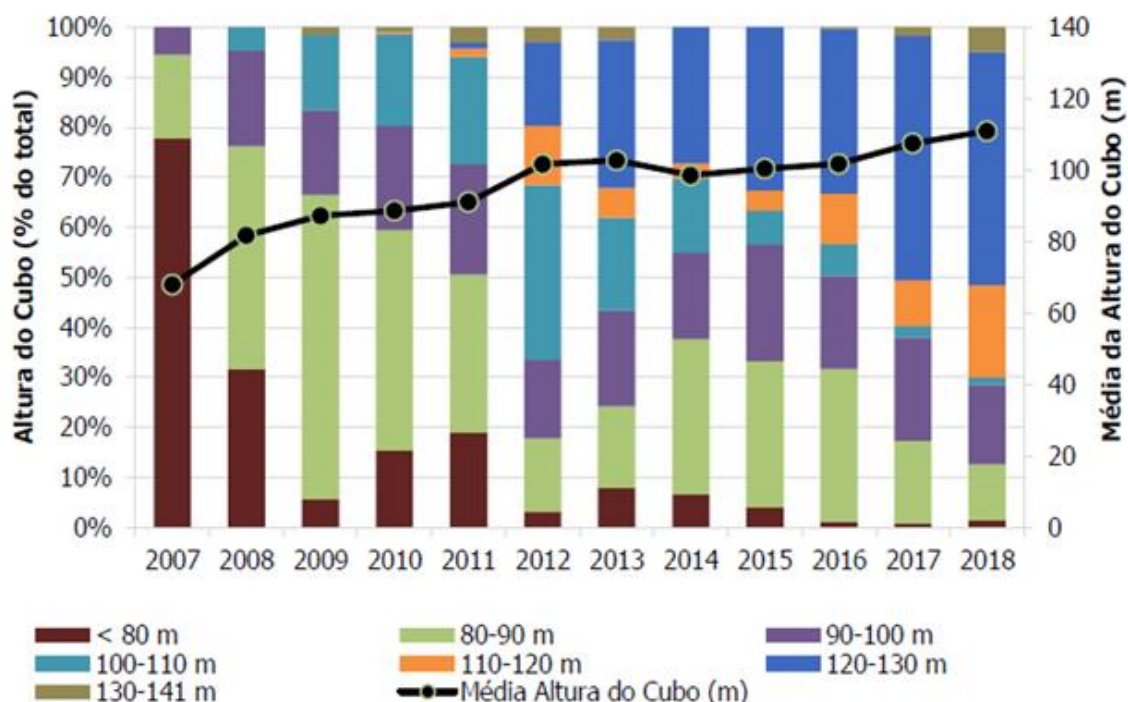
Incremento de altura das torres nos últimos anos. Fonte: EPE

Entretanto um levantamento da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) [2] mostrou que apenas

em 2018 mais de 40% dos projetos aprovados foram para aerogeradores de potência igual ou acima de 3 MW e 70% dos projetos com altura acima de 100 metros, portanto o cenário esta mudando e estamos saindo da zona de conforto.



Capacidade dos geradores nos últimos anos. Fonte: EPE



Tipos de torres por altura. Fonte: EPE

Este incremento no equipamento e na altura encontra alguns limitadores para o aço, sobretudo, devido às dimensões das peças necessárias na base para aumentar a rigidez de torres cada vez mais esbeltas. A partir de certa altura, o diâmetro da base ultrapassa 5,0 metros e a fim de se evitar problemas com a frequência natural, o peso do conjunto sofre um incremento em cerca de 10% devido ao aumento da espessura da torre. Este diâmetro encontra também limitações de transporte, seja na largura das vias, seja na altura dos viadutos, para o que já existem opções com seccionamento da base.

A alternativa que tem sido aplicada é a torre em concreto pré-moldado protendido. Fabricantes de aerogeradores já têm desenvolvido e testado estas alternativas há algum tempo para aerogeradores maiores e aplicado em parques eólicos. Este tipo de torre pode ser fabricada em diversas peças, transportadas e montadas no próprio parque. Mas o concreto também apresenta algumas desvantagens como maior quantidade de peças, portanto mais transporte e tempo de montagem.

Como comparação, a deflexão em torres com 100 metros de altura em aço pode chegar a mais de 1000 mm enquanto em concreto menos da metade. A fadiga também é um fator que reduz a durabilidade da torre de aço frente à opção de concreto. A torre de concreto é subdividida como ordem de grandeza em cerca de 25 anéis, a depender da altura, e estes anéis em cerca de 3 painéis partindo da base reduzindo-se o número até o topo.

Alternativa em desenvolvimento são as torres híbridas (base concreto + corpo de aço) com cerca de 40 metros iniciais em concreto ou mais que absorve melhor os esforços que chegam a base e o restante em aço solucionando o problema das dimensões da base, mas tornando mais complicada a ligação entre os diferentes materiais. Esta solução também se mostra favorável para regiões onde existe o risco sísmico que impacta mais fortemente a solução em concreto.

Em termos gerais temos as seguintes diferenças:

Torre	Altura (m)	Base (Ø) (m)	Peso (t/m)	Vantagens	Desvantagens
Aço	60 a 120	< 5	2 a 5	Menos material e transportabilidade ótima para torres < 80 metros	Custo alto de transporte e montagem e limite dimensões das peças > 80 mts
Concreto	60 a 120	3 a 8,5	8 a 19	Instalação rápida	Juntas vulneráveis e alto custo de transporte e montagem
Híbrida	80 a 150	3 a 5	3 a 15	Expectativa de solucionar desvantagens das alternativas anteriores	Em testes

Adaptado de Oriol, Pons et al (2017) [3] - Vantagens x Desvantagens por tipo de torre.

Cabe ressaltar aqui que a tecnologia envolvida na implementação de uma fábrica de torres metálicas é muito superior a tecnologia de uma fábrica de pré-moldados. Fábricas de pré-moldados são montadas provisoriamente em diversas obras de infraestrutura como metrô, portos, edifícios comerciais etc. Uma fábrica de pré-moldados para ser implantada em greenfield (sem contar o benefício da mobilidade) e com equipamentos novos tem ordem de grandeza de custo de cerca de R\$ 10 milhões o que aumenta conforme o tamanho do projeto e necessidade de entrega de peças mensal, mas podemos dizer que partem num valor 10 vezes menor que a de torres metálicas. Entretanto, quando os canteiros forem montados na própria obra existe um incremento de mão de obra nos trabalhos diretos do campo e a necessidade do investidor gerenciar de forma mais próxima às obrigações da subcontratada a fim de evitarem-se futuros passivos trabalhistas.

A indústria do concreto no Brasil é muito mais difundida que a do aço, porém na análise comparativa deve-se levar em conta a logística de transporte da chegada dos insumos, o custo de construção da fábrica de pré-moldados e o transporte das torres de aço, bem como a existência ou não de benefícios fiscais como o ICMS interestadual. Considerando tecnicamente possíveis ambos os tipos, de forma macro e numa análise conceitual podemos perceber que o custo da fábrica de concreto local dividido pelo número de torres a ser implementadas no parque deve ser menor que o custo de transporte de cada torre de aço para o parque a ser implantado em questão.

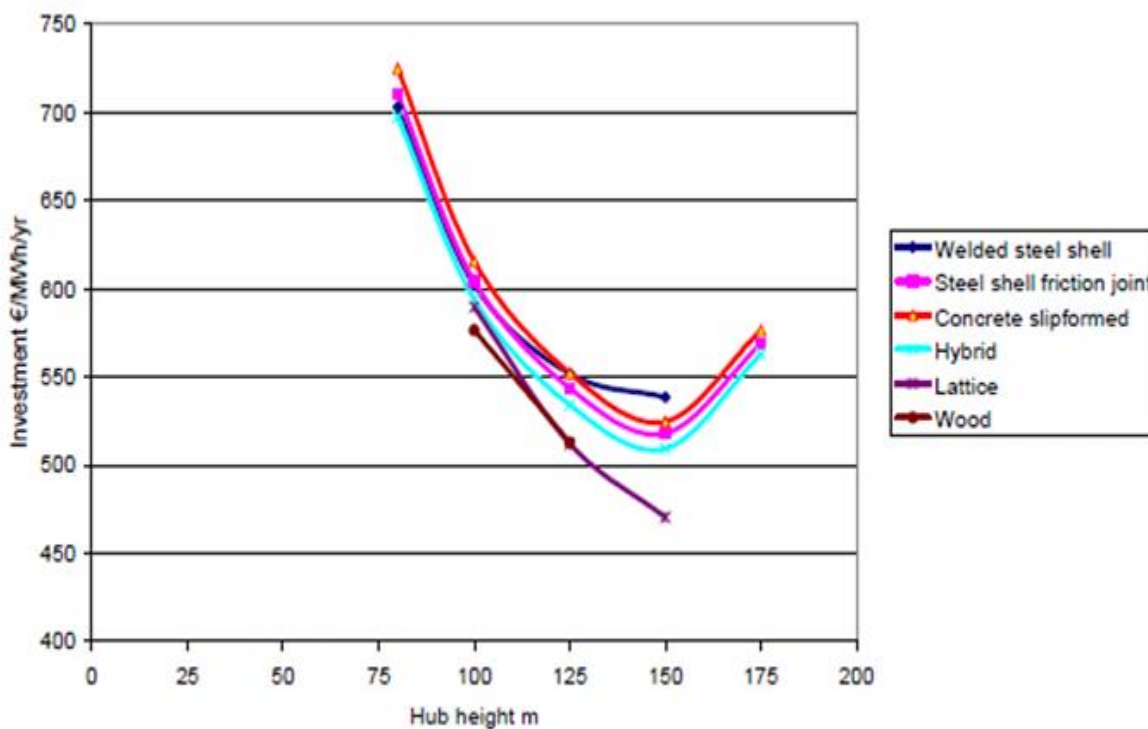
Apenas como reflexão, para um parque com 50 torres teríamos (R\$ 10 mi/50) cerca de R\$ 200 mil por torre o que começa a mostrar-se competitivo frente ao custo de transporte de uma torre metálica, lógico a depender das distâncias.

No Brasil hoje existem cerca de 8 fabricas de torres eólicas de aço e diversos fornecedores de canteiros para pré-moldados. Parece lógico esperar que as fábricas das torres de aço, por terem um CAPEX significativo comparativamente à opção concreto, devam investir em pátios móveis ou mesmo fixos de pré-moldados próprios a fim de se adequarem, em soluções híbridas, a esta nova demanda que está crescendo.

Cabe ainda ressaltar que, um estudo efetuado na Suécia [4] mostrou que com a tecnologia de içamento disponível hoje, as torres onshore acima de 150 metros de altura começam a perder competitividade onde guindastes muito grandes tornam-se gargalo destas operações principalmente durante a manutenção do parque.

Esta influencia do guindaste e o impacto nos custos é assunto já comentado em artigo no Canal Energia [5].

O estudo identifica o ponto ótimo com a tecnologia disponível atualmente.



Custo comparativo por tipo de Torre: Turbina de 3MW. Fonte: Elforsk

O ponto ótimo hoje de altura de torres onshore parece estar ao redor destes 150 metros. Porém já existem estudos de torres auto montantes, também estudos avaliando alternativas de ligas de aço mais resistentes com a utilização de Niobium, o que evidentemente deve ser desenvolvido num trabalho das fábricas de torres interessadas junto às siderúrgicas ou ainda alternativas com a utilização de concreto de ultra-alto desempenho.

Esta cadeia produtiva está se tornando muito competitiva para encarar a energia solar e demais opções, porém este amadurecimento sofre a influencia de benefícios e este ano as tarifas de uso dos sistemas de transmissão (Tust) e distribuição (Tusd) [6] retornam ao normal.

No Brasil as fabricas de torres metálicas atendem o mercado que as tem preferido por serem até o momento o padrão funcional, porém com o incremento das alturas os hoje cerca de também 8 fornecedores de torres de concreto devem encontrar mais concorrentes pelo caminho dispostos a disputar este mercado. Parece lógico então que os fornecedores de torres em aço se estruturam no desenvolvimento das alternativas híbridas junto aos fabricantes de aerogeradores e proponham soluções integradas para continuarem competitivos.

Estamos vivenciando uma corrida tecnológica e no final todos os envolvidos no processo, investidores em energia, fabricantes de aerogeradores, fabricantes de torres, siderúrgicas e projetistas estimularão o desenvolvimento deste mercado correndo atrás do potencial estimado em 21 GW no Brasil (PDE 2029, EPE) [7] para os próximos 10 anos ou mais de 7.000 torres para aerogeradores de potência média considerada em 3 MW.

### **Complementar:**

[1] Lantz, Eric et al: Increasing Wind Turbine Tower Heights: Opportunities and Challenges. Golden, CO. National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-73629, (2019) <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73629.pdf>

[2] Participação de Empreendimentos Eólicos nos Leilões de Energia no Brasil, EPE-DEE-NT-041/2018-r0. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), (2018) [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-394/NT\\_EPE-DEE-NT-041\\_2018-r0.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-394/NT_EPE-DEE-NT-041_2018-r0.pdf)

[3] O. Pons, et al: Towards the sustainability in the design of wind towers. Energy Procedia, vol. 115, pp. 41–49, (2017) <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.005>

[4] Engstrom, Staffan et al: Tall Towers for large wind turbines, Elforsk rapport 10:48, Stockholm (2010) <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/992745>

[5] Cianciarullo, M.I.; Construção de Parques Eólicos: Equipamento do Caminho Crítico. Canal Energia (2020) <https://www.canalenergia.com.br/artigos/53142797/construcao-de-parques-eolicos-equipamento-do-caminho-critico>

[6] Barroso, Luiz; Bezerra, Bernardo: A MP 998 e os mecanismos para a consideração dos benefícios ambientais. PSR, (2020) <https://energia.aebroadcast.com.br/>

[7] Plano Decenal de Expansão de Energia 2029, Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), (2020) <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202029.pdf>

(1) Artigo publicado na Agência CanalEnergia. Disponível em:

<https://www.canalenergia.com.br/artigos/53151165/torres-eolicas-aco-x-concreto>. Acesso em 28 de outubro de 2020.