



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

ANDRÉ BARROSO ROCHA

**UMA AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE TORRES PARA
AEROGERADORES DE AÇO TUBULARES E DE CONCRETO
PRÉ-MOLDADO PROTENDIDO NA REGIÃO DE SERRA DO
MEL, RIO GRANDE DO NORTE.**

**NATAL-RN
2016**

André Barroso Rocha

Uma avaliação comparativa entre torres para aerogeradores de aço tubulares e concreto pré-moldado protendido na região de Serra do Mel, Rio Grande do Norte.

Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Monografia, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Eugênio Ramos

Natal-RN
2016

Catálogo da Publicação na Fonte
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Sistema de
Bibliotecas Biblioteca Central Zila Mamede / Setor de Informação e
Referência

Rocha, André Barroso.

Uma avaliação comparativa entre torres para aerogeradores de aço tubulares e de concreto pré-moldado protendido na região de Serra do Mel, Rio Grande do Norte / André Barroso Rocha. - 2016.

61 f. : il.

Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Natal, RN, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Eugênio Ramos.

1. Energia eólica - Monografia. 2. Torre de aço - Monografia. 3. Torre de concreto - Monografia. I. Ramos, Rubens Eugênio. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.548

André Barroso Rocha

Uma avaliação comparativa entre torres para aerogeradores de aço tubulares e concreto pré-moldado protendido na região de Serra do mel, Rio Grande do Norte.

Trabalho de conclusão de curso na modalidade Monografia, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 17/11/2016:

Prof. Dr. Rubens Eugênio Ramos, Eng. Civil, UFRN – Orientador

Prof. Dr. José Luiz da Silva Júnior, Eng. Eletricista, UFRN

Prof. Dr. Renato Samuel Barbosa de Araújo, Eng. Civil, IFRN

Natal-RN

2016

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, por serem os principais responsáveis por tudo que alcancei até hoje, me apoiando e acreditando no meu potencial. Dedico também a todos amigos e familiares que me deram suporte durante toda minha graduação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho só foi possível graças ao apoio, amizade e amor de muitas pessoas, as quais sempre farão parte da minha história.

Agradeço primeiramente à Deus, por iluminar meu caminho e guiar meus passos durante toda graduação. Agradeço por ter me dado saúde para encarar todos os desafios dessa minha jornada.

Aos meus pais, Alpheu Eduardo e Maria Teresa, meu irmão, Arthur, e minha irmã, Maria, por todo apoio, suporte e paciência. Esta é uma conquista em conjunto. Sozinho nunca seria capaz.

À toda minha família, que mesmo distante estavam sempre acompanhando meu desenvolvimento e torcendo por mim.

À minha namorada, Juliana Costa, por toda paciência, ajuda e carinho durante toda realização do trabalho.

Ao meu orientador, Rubens Ramos, por toda dedicação, orientação e paciência durante a elaboração deste trabalho. Obrigado por todos ensinamentos compartilhados não só durante o TCC, mas durante toda graduação.

Aos demais professores, pelos ensinamentos nas diversas áreas que possibilitaram meu desenvolvimento profissional e pessoal.

À todos os amigos que fizeram parte da minha história, compartilhando não só mesas de estudo, mas também ansiedade antes das provas, estresse nos longos trabalhos, além dos bons momentos juntos. Obrigado por tornar o ambiente da UFRN descontraído e animado.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte por possibilitar a realização deste sonho.

À todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para elaboração deste trabalho.

André Barroso Rocha

RESUMO

Uma avaliação comparativa entre torres eólicas de aço tubulares e concreto pré-moldado protendido na região de Serra do mel, Rio Grande do Norte.

Autor: André Barroso Rocha

Orientador: Rubens Eugênio Ramos

Departamento de Engenharia Civil - UFRN

Natal, novembro de 2016

O presente trabalho tem como objetivo principal fazer uma avaliação comparativa embasada em critérios estratégicos, logísticos e econômicos de duas alternativas de torres de aerogeradores que dominam o mercado eólico brasileiro: as torres de aço tubulares e as torres de concreto pré-moldado protendido. O estudo analisa especificamente a implantação das torres no município de Serra do Mel, Rio Grande do Norte, e tem como foco a consideração da tendência mundial de desenvolvimento de torres altas. A exploração comercial da energia eólica é relativamente recente no mundo. O primeiro aerogerador a iniciar uma operação comercial foi na Dinamarca, em 1976. O Brasil começou o desenvolvimento expressivo do mercado eólico há menos tempo, a partir de 2004, com a criação do PROINFA. O país possui um grande potencial eólico e o Rio Grande do Norte tem expressiva participação neste cenário. Quanto à metodologia, foi realizada uma pesquisa bibliográfica para levantamento das alternativas de torres e a escolha das que seriam estudadas neste trabalho, além de se destacar os principais critérios a serem avaliados. Os critérios estabelecidos foram divididos em estratégicos e econômicos. Os critérios estratégicos que serão destacados são os aspectos logísticos, o fornecimento da matéria prima e o desempenho estrutural do elemento. Os critérios econômicos analisados foram os custos durante a vida útil da torre de aerogerador, ou seja, o custo de aquisição, o custo de manutenção e o custo de desmobilização. As avaliações comparativas econômicas foram feitas, no caso das torres metálicas, com base em cotações reais de mercado, e para as torres de concreto, foram realizadas estimativas de quantitativos, para que seja estimado os custos a serem analisados. Os resultados obtidos foram que as torres de concreto possuem vantagens em termos de custos e é a melhor alternativa para torres altas, se comparada com a de aço. Porém a dificuldade de desmobilização dessas torres pode trazer prejuízos ambientais e econômicos que inviabilizam sua utilização.

Palavras-chave: Energia Eólica. Torre de aço. Torre de concreto. Custos.

ABSTRACT

A comparative evaluation between steel tubular and pretensioned pre-cast concrete wind turbine towers located in Serra do Mel, Rio Grande do Norte.

Author: André Barroso Rocha

Supervisor: Rubens Eugênio Ramos

**Department of Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Norte, Brazil
Natal, November 2016**

This monograph has the main objective to do a comparative evaluation based on strategic, logistics and economics criteria of two alternatives of wind turbine towers that dominate the wind Brazilian market: steel tubular towers and pretensioned pre-cast concrete tower. This study analyses the construction of wind turbines towers in the city of Serra do Mel, Rio Grande do Norte, and it has as the focus the world trend of tall towers development. The commercial exploration of wind power is relatively recent on the world. The first wind turbine to initiate a commercial operation was in Denmark, in 1976. Brazil has started the expressive development on the wind market recently, in 2004, with PROINFA. The country has a large wind potential and the state of Rio Grande do Norte has expressive participation on this scenario. About the methodology, it was applied a literature research to a data survey about the tower alternatives and choice of which would be studied at this research, besides highlight the main criteria to be evaluated. The established criteria were divided on strategic criterial and economical criterial. The strategical criterial that will be highlighted are logistics, the supply of raw material and structural performance of the element. The economic points analyzed were the costs during the equipment lifetime, the acquisition cost and the demobilization cost. The economics comparative evaluations were done, regarding the steel towers, using a real price quote of the market, and, for the concrete towers, were done quantitative estimative to the costs estimative could be done. The results were that the concrete towers has advantage in the strategical criterial and costs and it is the best solution for tall towers. However, the demobilization difficulties of those towers can bring environmental and economic losses that can turn the project unfeasible.

Keywords: Wind power. Steel tower. Concrete tower. Costs.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.1.1.	História	1
1.1.2.	Panorama atual da Energia Eólica no Mundo.....	3
1.1.3.	Panorama Atual da Energia Eólica no Brasil	6
1.1.4.	Panorama atual da Energia Eólica no Rio Grande do Norte	9
1.2.	PROBLEMÁTICA DE PESQUISA	12
1.3.	OBJETIVOS.....	12
1.3.1.	Objetivo Geral	12
1.3.2.	Objetivos Específicos	12
1.4.	JUSTIFICATIVA.....	13
1.5.	DINÂMICA DO MERCADO EÓLICO	13
1.6.	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
2.	MÉTODOS.....	15
2.1.	LEVANTAMENTO DE ALTERNATIVAS DE TORRES	15
2.2.	ESCOLHA DE CRITÉRIOS	16
3.	ALTERNATIVAS DE TORRES PARA AEROGERADORES	16
3.1.	TORRE DE AÇO TUBULAR COM SOLDA VERTICAL E HORIZONTAL	16
3.2.	TORRE DE CONCRETO PROTENDIDO	18
3.2.1.	Torre de concreto pré-moldado protendido	18
4.	AValiação DE CRITÉRIOS	21
4.1.	ASPECTOS INTRODUTÓRIOS	21
4.1.1.	Custos de um projeto de usina eólica	21
4.1.2.	Tendência do desenvolvimento de torres altas	24
4.2.	CRITÉRIO LOGÍSTICO	26
4.3.	DESEMPENHO ESTRUTURAL.....	29
4.4.	FORNECIMENTO DE MATÉRIA PRIMA	32

4.5.	CUSTO DE AQUISIÇÃO	36
4.5.1.	Custo de Material.....	37
4.5.2.	Custos de transporte.....	42
4.5.3.	Custo de montagem	46
4.5.4.	Resultado do Custo de aquisição	47
4.6.	CUSTOS DE MANUTENÇÃO.....	48
4.7.	CUSTOS DE DESMOBILIZAÇÃO.....	52
4.8.	ANÁLISE DE RESULTADOS	53
5.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	56
	REFERÊNCIAS	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Primeiro aerogerador, por Charles F. Bruch, em 1888.....	1
Figura 2 Evolução de Aerogeradores	2
Figura 3 Atlas do Potencial Eólico Brasileiro	8
Figura 4 Pintura de Torre tubular de Aço soldadas longitudinalmente e transversalmente	17
Figura 5 Processo de fabricação de torres pré-moldadas e torre montada	19
Figura 6 SCBS para um projeto de usina eólica.....	22
Figura 7 Torre metálica oxidada	50
Figura 8 Corrosão tratada com resina epoxi.....	50
Figura 9 Torre de concreto em boas condições. Corrosão no segmento metálico	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Geração de energia eólica no Brasil em 2014 e 2015	9
Tabela 2 Valores de LCOE para um projeto no interior do EUA	24
Tabela 3 Acréscimo de energia gerada com o aumento de altura em um parque na África do Sul.....	26
Tabela 4 Aumento do peso da torre e da espessura da chapa com aumento de altura, para diferentes diâmetros.....	28
Tabela 5 Tabela de aspectos discutidos do Critério Logístico	29
Tabela 6 Comparação entre deflexão no topo das torres de aço e concreto.....	31
Tabela 7 Aspectos discutido no critério Desempenho Estrutural.....	32
Tabela 8 Aspectos discutidos no critério Fornecimento de Matéria Prima.....	36
Tabela 9 Dimensões das Torres calculadas	38
Tabela 10 Custo unitário de acordo com preço de mercado na África do Sul	38
Tabela 11 Custos de material das torres	39
Tabela 12 Custo de material com fundação	39
Tabela 13 Custo de material total, Fundação + Torre	39
Tabela 14 Cotação real de torres metálicas	40
Tabela 15 Estimativa de custo de material de torres de concreto de 80 e 100 metros.	42
Tabela 16 Comparação de custos entre torres de concreto e aço	42
Tabela 17 Porcentagem do custo de transporte da torre para o custo de transporte total	44
Tabela 18 Custos de transportes das torres de concreto e de aço para Serra do Mel .	46
Tabela 19 Custo de montagem das torres de concreto e aço.....	47
Tabela 20 Custo total de aquisição de torres de concreto e metálicas de 100 metros	47
Tabela 21 Aspectos discutidos no critério Custos de Aquisição.....	48
Tabela 22 Aspectos discutido sobre o critério Custo de Manutenção.....	51
Tabela 23 Aspectos discutidos no critério custos de desmobilização	53
Tabela 24 Tabela geral de resultado de Avaliação comparativa entre torres de aço e de concreto	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Potência instalada acumulada de Energia eólica no mundo 2000 - 2015	3
Gráfico 2 Potência instalada no mundo em 2015.....	3
Gráfico 3 Os 10 primeiros países em potência instalada acumulada em 2015	4
Gráfico 4 Novas potências instaladas em 2015.....	5
Gráfico 5 Potência Instalada na Europa em 2015	6
Gráfico 6 Matriz Energética da Europa em 2000 (esq.). Matriz Energética da Europa em 2015(dir.)	6
Gráfico 7 Matriz Energética do Brasil em 2014.....	7
Gráfico 8 Capacidade total potência instalada de energia eólica por UF.....	10
Gráfico 9 Capacidade total de potência em construção por UF.....	10
Gráfico 10 Capacidade total de potência contratada/outorgada (construção não iniciada) por UF.....	10
Gráfico 11 Comparação Brasil x RN: Território, População, PIB e Operação comercial de energia eólica	11
Gráfico 12 Porcentagem de cada componente do custo no custo total	23
Gráfico 13 Decréscimo de investimento por MWh gerado em um parque eólico na Suécia, turbina 5 MW Offshore e 3 MW onshore	25
Gráfico 14 Evolução do custo de material total	40
Gráfico 15 Porcentagem de custo de transporte da torre de 80 metros em relação ao custo de transporte total.....	44
Gráfico 16 Porcentagem do custo de uma torre de 100 metros em relação ao custo total de transporte	45

LISTA DE SIGLAS

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica

ATS – Advanced Tower System

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento

CapEx – *Capital Expenditures*

CERNE – Centro de Estratégia em Recursos Naturais e Energia

CNI - Conselho Nacional de Infraestrutura

DEWI – *Deutsches Windenergie-Institut*

DTS – *Dois A Tower Systems*

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EWEA – European Wind Energy Association

FINAME – Agência Especial de Financiamento Industrial

GWEC – *Global Wind Energy Council*

LCOE – *Levelized Cost of Energy*

NREL – *National Renewable Energy Laboratory*

OpEx – *Operational Expenditures*

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas

SCBS – *System Cost Breakdown*

SEERN – Sindicato das Empresas do Setor Energético Brasileiro

WASA – *Wind Association of South Africa*

1. INTRODUÇÃO

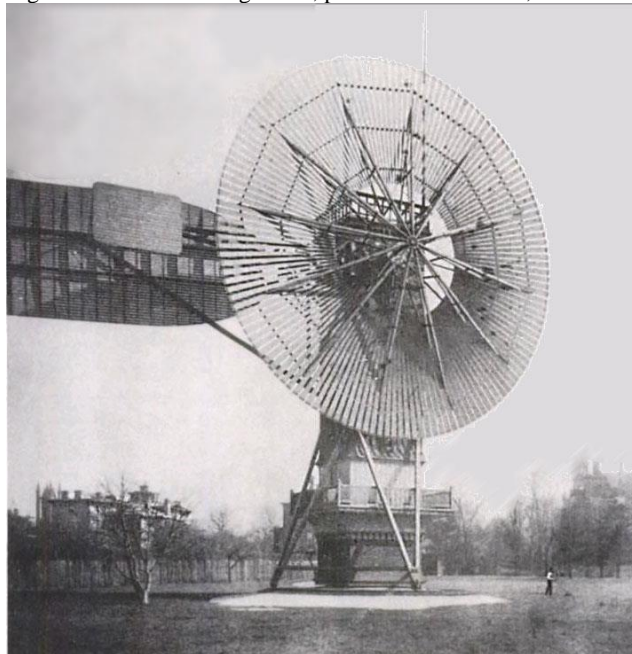
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO

1.1.1. História

A energia eólica é utilizada a milhares de anos. Os primeiros usos desse tipo de energia foram para moagem de grãos, bombeamento de água e na movimentação de barcos nas navegações para fluxo de pessoas e principalmente de mercadorias. O início do uso da energia eólica para energia elétrica foi em meados do século XIX, mas somente um século depois, com a crise internacional do petróleo (década de 1970), é que houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial.

Em 1888, Charles F. Brush, um industrial voltado para eletrificação em campo, ergueu na cidade de Cleveland, Ohio, o primeiro cata-vento destinado à geração de energia elétrica (Scientific American, 1890 apud Shepherd,1994). Porém, a energia elétrica era gerada a custos menores através da queima de combustíveis fósseis, como o carvão e petróleo, e por isso a energia eólica não era competitiva nesse tempo. A Figura 1 mostra o primeiro cata-vento destinado a geração de energia elétrica.

Figura 1 - Primeiro aerogerador, por Charles F. Brush, em 1888



Fonte: Google imagens

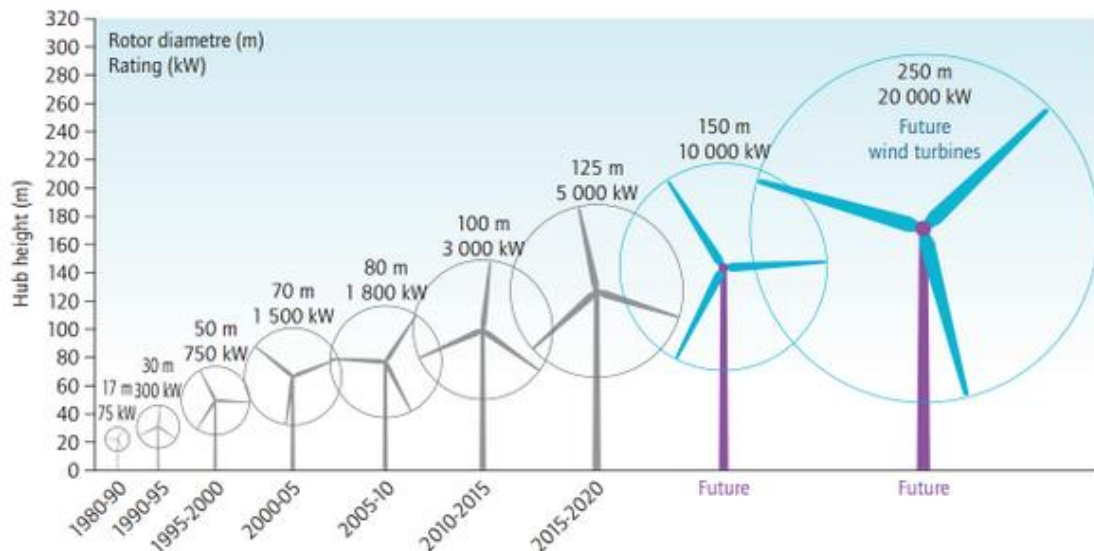
A popularidade da energia eólica sempre oscilou muito com o preço dos combustíveis fósseis. Logo após a Segunda Guerra Mundial, quando o preço dos combustíveis caiu, o interesse em aerogeradores diminuiu. Entretanto, com a Crise do Petróleo em 1970, a

investigação e desenvolvimento em aerogeradores permitiram introduzir novas formas de converter energia eólica em energia útil.

A primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada em 1976, na Dinamarca. Atualmente, existem mais de 30 mil turbinas eólicas em operação no mundo.

Portanto o desenvolvimento da energia eólica teve como variável a oscilação dos preços dos combustíveis fósseis, fator esse determinante para o início do desenvolvimento comercial dessas turbinas. Os aerogeradores vem se desenvolvendo e continuam a evoluir até os dias de hoje. O comércio de aerogeradores no mundo se desenvolveu rapidamente em tecnologia e tamanhos durante os últimos 15 anos, como mostra a Figura 2.

Figura 2 Evolução de Aerogeradores



Fonte: EWEA – European Wind Energy Association

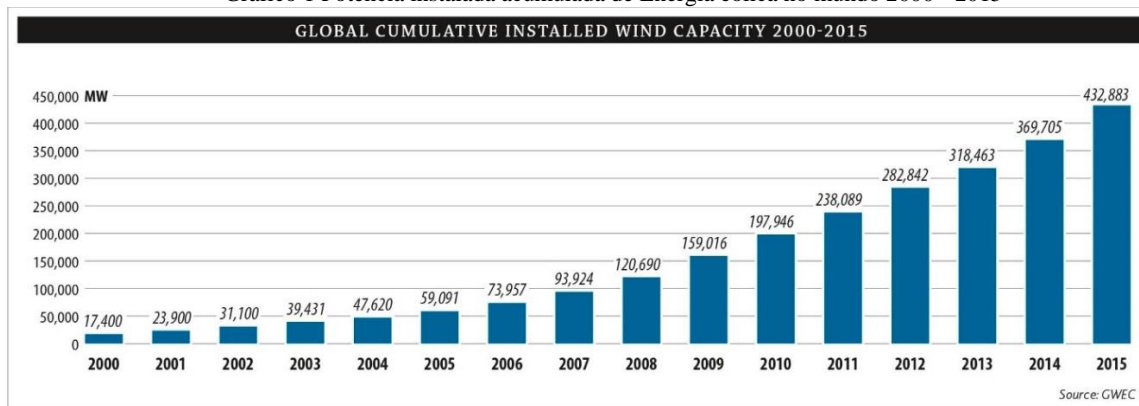
As turbinas estão crescendo cada vez mais e conseqüentemente as torres. A mudança na potência das turbinas, acarretando no aumento do tamanho dela e esforços transferidos para a torre trouxeram grandes mudanças nas tecnologias e material dos suportes de aerogerador. As torres metálicas, com sua facilidade e rapidez de montagem, lideraram o mercado no início do desenvolvimento da energia eólica comercial. Entretanto, com o desenvolvimento de turbinas cada vez maiores, necessitando assim de torres cada vez maiores, as torres de concreto foram ganhando espaço e hoje predominam o mercado de grandes torres. Essas diferenças entre tecnologias vão ser discutidas nesse trabalho.

1.1.2. Panorama atual da Energia Eólica no Mundo

O estímulo ao desenvolvimento da energia eólica, como dito na seção anterior, data da crise do petróleo na década de 70 do século passado. Em 1978, o governo da Califórnia estabeleceu um sistema de subsídios e tarifas especiais para a geração eólica, dando lugar à construção de quinze mil máquinas, com capacidade agregada de 1,3 GW. Programas similares, de estímulo ao mercado, foram criados na Dinamarca, Alemanha, Espanha, Reino Unido e Índia (CNI - Conselho Temático de Infraestrutura, 2008).

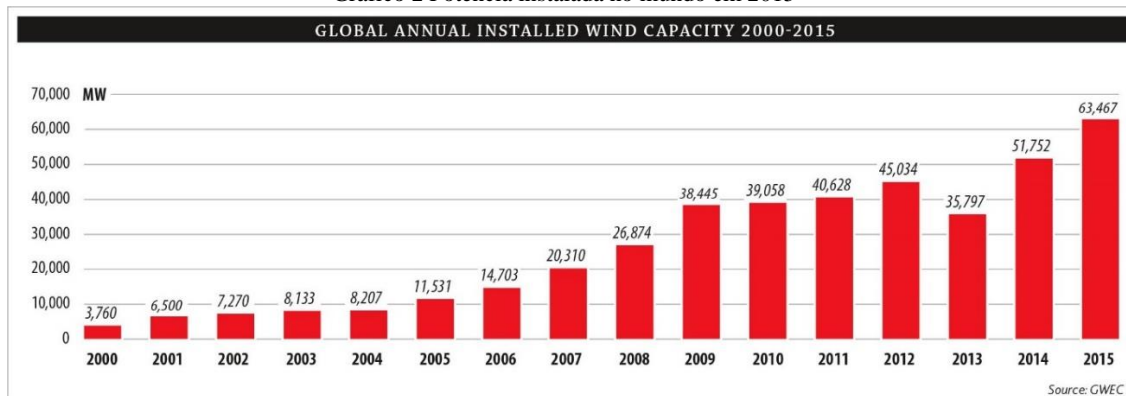
Essas políticas de estímulo ao mercado eólico continuam até hoje, levando a energia eólica ao crescimento astronômico em capacidade instalada nos últimos 15 anos (Gráfico 1). E esse crescimento tem sido a taxa cada vez maiores por ano, como mostra o estudo estatístico levantado pela Global Wind Energy Council – GWEC, mostrado no Gráfico 2. Isso mostra que o mercado eólico atingiu uma diversidade de países nesses últimos anos, e muito devido a isso, a capacidade instalada mundial tem crescido a taxa maiores. A taxa de aumento de 2008 a 2015 foi em média de 5,13%, enquanto nos primeiros 7 anos do levantamento, a taxa média de aumento foi de 3,76%.

Gráfico 1 Potência instalada acumulada de Energia eólica no mundo 2000 - 2015



Fonte: GWEC

Gráfico 2 Potência instalada no mundo em 2015

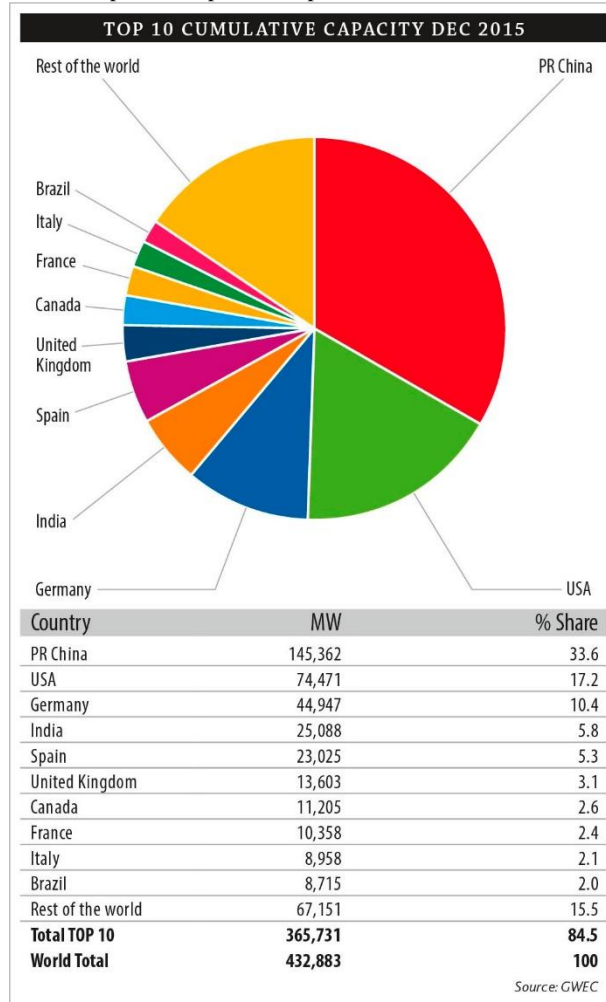


Fonte: GWEC

A Europa é líder em tecnologia de aerogeradores desde de quando a energia eólica começou a se desenvolver em 1970. No entanto, a China se destaca no que tange capacidade instalada. O governo chinês vê as energias renováveis como estratégia prioritária, liberando assim uma série de subsídios. O altíssimo grau de poluição em muitas cidades do país vem incentivando o uso desse tipo de energia.

A diferença de capacidade instalada da China comparado com os outros países logo atrás no ranking é muito grande, superando a capacidade de Estados Unidos, Alemanha e Índia somadas, a segunda, terceira e quarta colocadas respectivamente. O Gráfico 3 mostra os 10 primeiros países em capacidade instalada.

Gráfico 3 Os 10 primeiros países em potência instalada acumulada em 2015

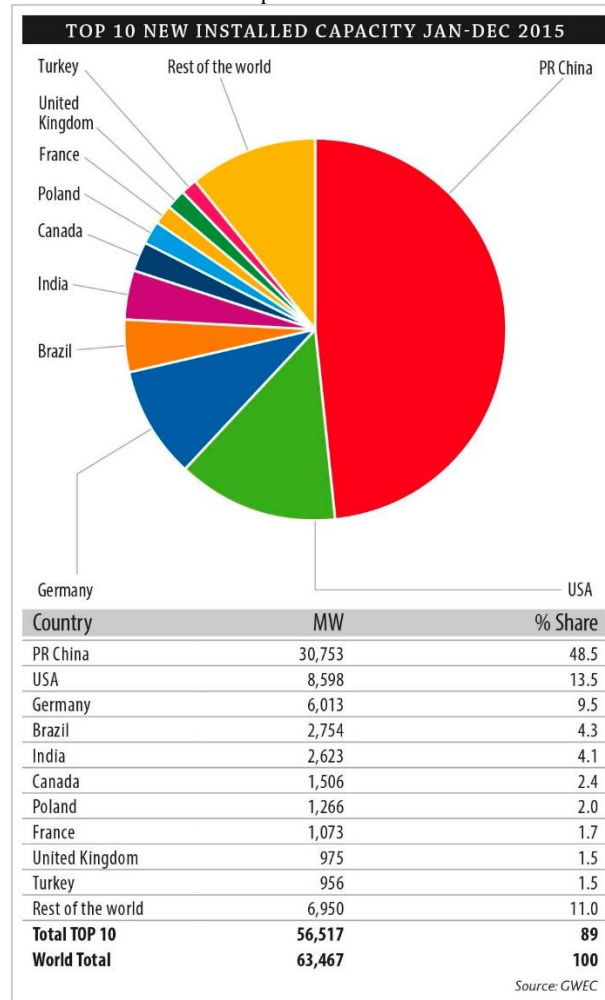


Fonte: GWEC

E essa diferença tende a aumentar ainda mais nos próximos anos. No ano de 2015, a China implantou metade da potência instalada no mundo todo, como se pode ver no Gráfico 4.

Em depoimento ao jornal BBC, Ma Jinru, vice-presidente da Goldwind, uma das maiores empreendedoras de parques eólicos no país, deixou claro que, "No futuro, quando os recursos ficarem ainda mais limitados, os preços subirem mais e a poluição piorar, a sociedade vai cobrar o custo social disso. Então, a longo prazo, o custo da energia eólica vai ficar abaixo do de carvão. O custo da eólica também vai cair por conta da inovação tecnológica, e o setor vai ter um imenso crescimento."

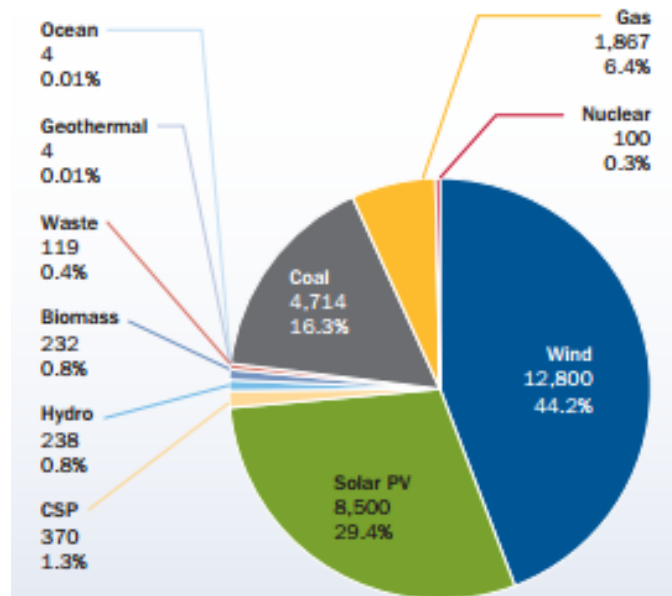
Gráfico 4 Novas potências instaladas em 2015



Fonte: GWEC

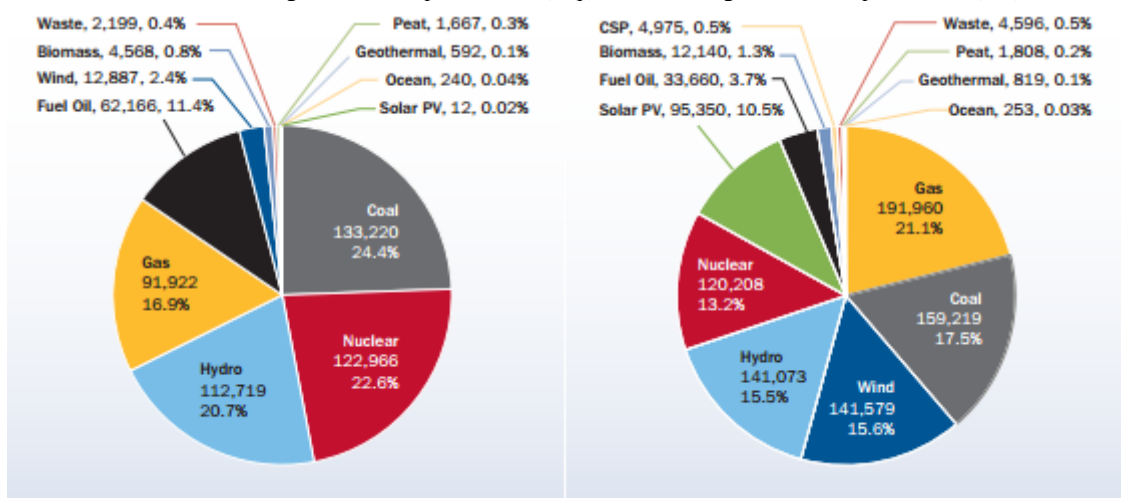
O crescimento da alternativa energia eólica em relação as outras alternativas também são de se destacar. Utilizando a Europa como exemplo, temos que a energia eólica representa quase metade de toda potência instaladas no ano de 2015, seguido da energia solar, mostrando a força das fontes alternativas nos dias de hoje, como mostra o Gráfico 5. O Gráfico 6 mostra a comparação da participação de todas as fontes de energia na Europa, nos anos de 2000 e 2015, mostrando a evolução da energia eólica nos últimos 15 anos.

Gráfico 5 Potência Instalada na Europa em 2015



Fonte: European Wind Energy Association – EWEA

Gráfico 6 Matriz Energética da Europa em 2000 (esq.). Matriz Energética da Europa em 2015 (dir.)

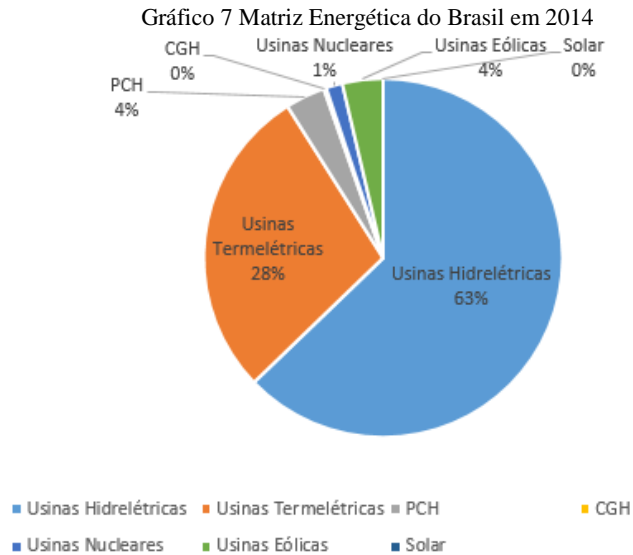


Fonte: EWEA

1.1.3. Panorama Atual da Energia Eólica no Brasil

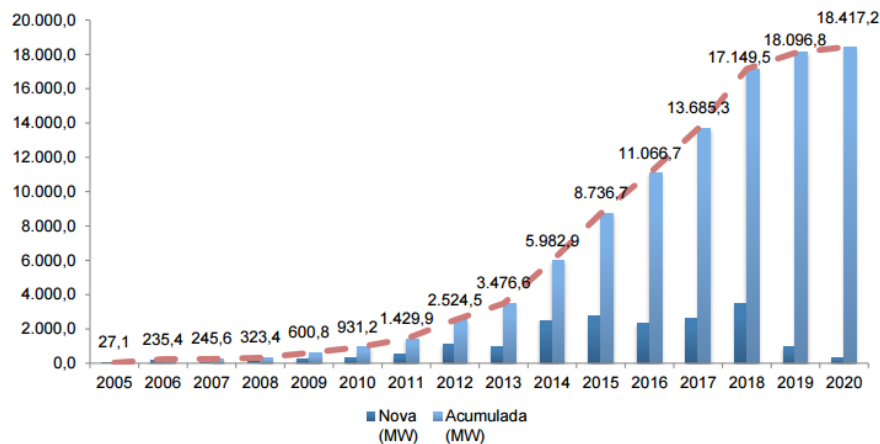
A energia eólica no Brasil começou a se desenvolver em uma data recente se comparado com o resto do mundo. Em 2004, foi instituído o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica a partir de fontes alternativas, promovendo a diversidade da matriz energética brasileira. Uma matriz energética diversificada traz segurança no abastecimento de energia

elétrica. Em 2001, o Brasil sofreu uma recessão energética devido à escassez vivida na época, demonstrando a séria dependência da energia hídrica. Em 2014, a energia elétrica através de hidrelétricas representava 63% da matriz energética brasileira, como mostra o Gráfico 7.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE)

Com o sucesso do primeiro leilão específico para energia eólica, em 2009, a energia eólica no Brasil deu um salto muito grande nos anos subsequentes. Com 1.915 MW leiloados, divididos em 71 parques, o leilão de 2009 abriu portas para os leilões posteriores, tendo consequência o impulso da capacidade eólica instalada no Brasil, como pode se ver no Gráfico 8. Hoje, a potência instalada é de cerca de 10,0 GW, segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), com cerca de 8,37 GW já leiloados e que estão em processo de desenvolvimento ou construção, resultando assim em um aumento de 83% da capacidade eólica instalada até 2019.



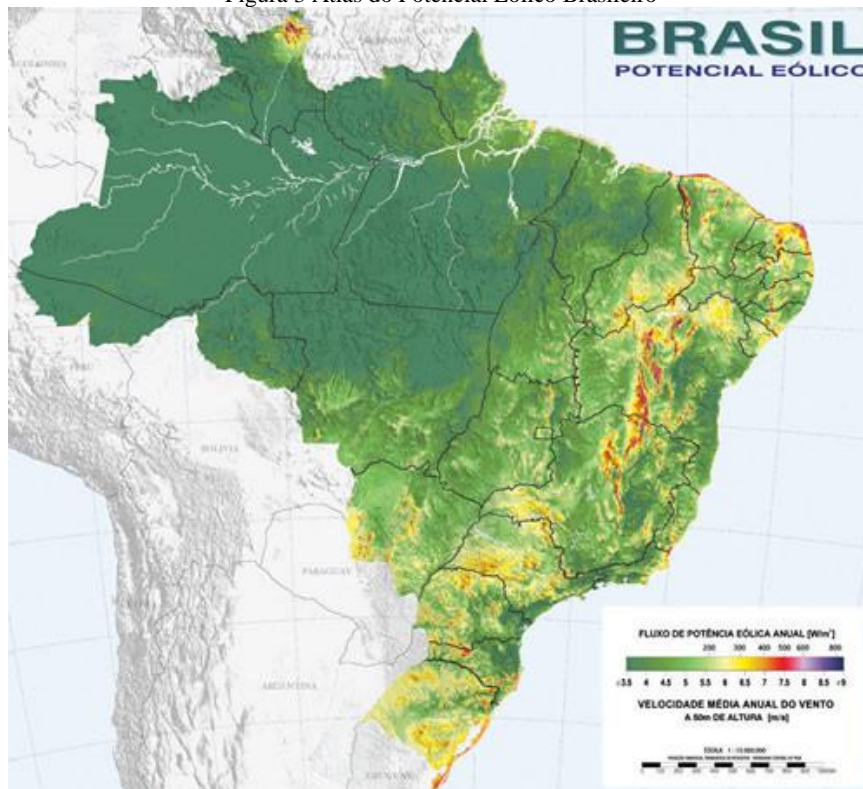
Fonte: Associação brasileira de Energia Eólica – ABEEólica

O Brasil teve um desenvolvimento acelerado durante esse tempo. No período, a indústria eólica manteve crescimento acelerado, mesmo no ambiente macroeconômico brasileiro desfavorável, tendo sido um dos únicos setores de infraestrutura com grau de investimento positivo. O Brasil é um dos países que mais desenvolveu o setor eólico, sendo o quarto com maior capacidade instalada em 2015 (Gráfico 4). O país saiu de um cenário onde a energia eólica era inexistente a figurar entre os 10 países com maior capacidade instalada do mundo (Gráfico 3).

Esse desenvolvimento acelerado se deu em grande parte pelo potencial do Brasil em geração de energia através dos ventos. Alemanha, França, Espanha voltaram os olhares para o país devido a qualidade de seus ventos, principalmente na região nordeste. A Figura 3 mostra o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.

Em 2001, quando foi lançado o primeiro Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, a estimativa de potencial eólico brasileiro era de 143 GW, considerando torres de até 50 metros. Considerando os últimos desenvolvimentos tecnológicos, o “Deutsches Windenergie-Institut” (Instituto Alemão de Energia Eólica) – DEWI estima que o potencial eólico brasileiro é de 500 GW, sem considerar o potencial “off-shore”.

Figura 3 Atlas do Potencial Eólico Brasileiro



Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito - CRESESB

1.1.4. Panorama atual da Energia Eólica no Rio Grande do Norte

O Nordeste brasileiro tem sido o grande responsável pela geração de energia devido à enorme qualidade de seu vento. Élbria Gannoum, presidente da ABEEólica, explica que, enquanto a média de produtividade de um gerador eólico é de 28% a 30% no mundo e supera 50% no Brasil, este índice atinge picos de 83% no Nordeste. Os ventos no Nordeste chamam atenção por ter uma velocidade acima da necessária para a produção de energia, além desse vento ter “qualidade”. São ventos que não possuem grande variação de direção, sendo unidirecional e estável, sem rajadas. Isso explica o fato do Nordeste ter um dos maiores fatores de capacidade do mundo. O Nordeste representa aproximadamente 80% da geração de energia eólica no Brasil, como mostra a Tabela 1.

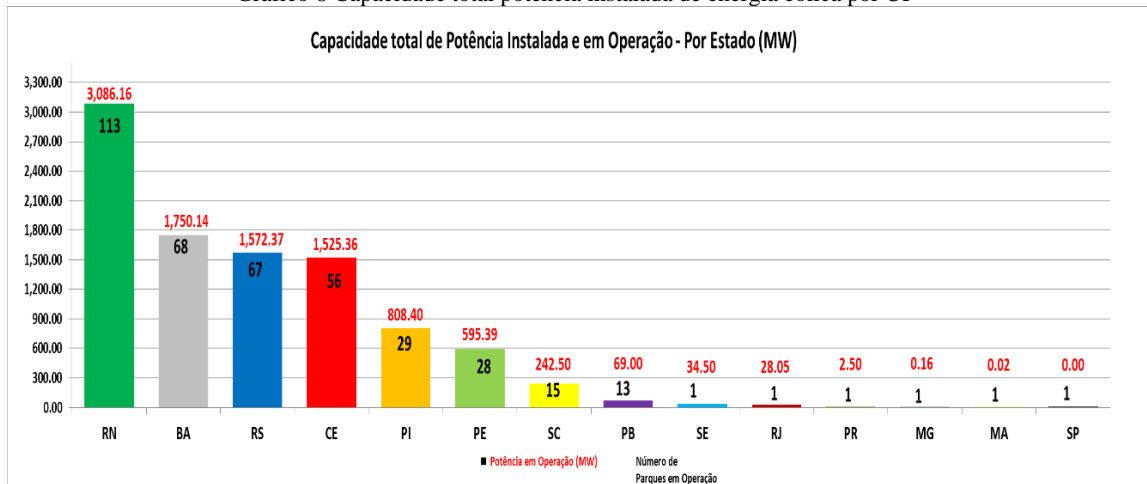
Tabela 1 Geração de energia eólica no Brasil em 2014 e 2015

REGIÃO	2014		2015		% DE CRESCIMENTO
	GERAÇÃO (TWH) ⁶	REPRESENTATIVIDADE	GERAÇÃO (TWH) ⁶	REPRESENTATIVIDADE	
Sudeste	0,08	0,7%	0,08	0,4%	-2,4%*
Sul	2,06	17,9%	3,59	17,4%	74,4%
Nordeste	9,36	81,4%	16,95	82,2%	81,1%
Total	11,50	-	20,62	-	-

Fonte: ABEEólica

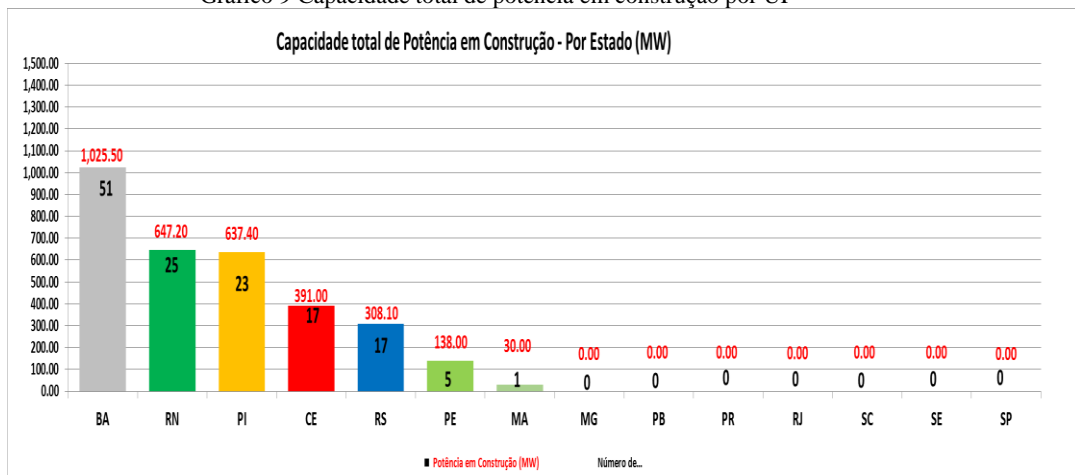
O Rio Grande do Norte seguiu o desenvolvimento do país em energia eólica. O estado se destaca não só em relação a região Nordeste, como no país inteiro, sendo líder em capacidade instalada. Até Julho de 2015, O Rio Grande do Norte tinha aproximadamente 30% da capacidade instalada de energia eólica do país, como mostra a Gráfico 9. Nas usinas a serem construídas, esteja em construção (Gráfico 10) ou construção a ser iniciada (Gráfico 11), o Rio Grande do Norte também se destaca, ficando só atrás da Bahia em capacidade a ser instalada.

Gráfico 8 Capacidade total potência instalada de energia eólica por UF



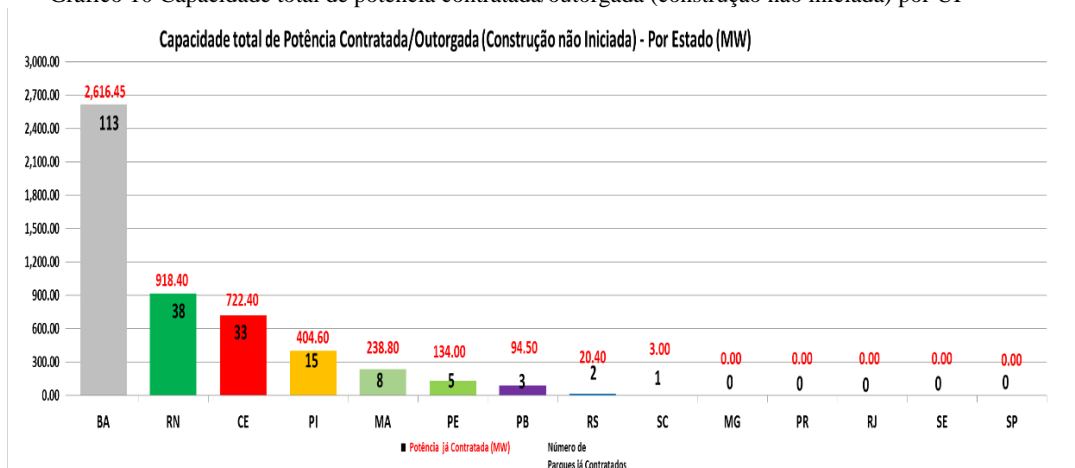
Fonte: Centro de Estratégias em Recursos Naturais & Energia - CERNE; e Sindicato das Empresas do Setor Energético do RN - SEERN

Gráfico 9 Capacidade total de potência em construção por UF



Fonte: Centro de Estratégias em Recursos Naturais & Energia - CERNE; e Sindicato das Empresas do Setor Energético do RN - SEERN

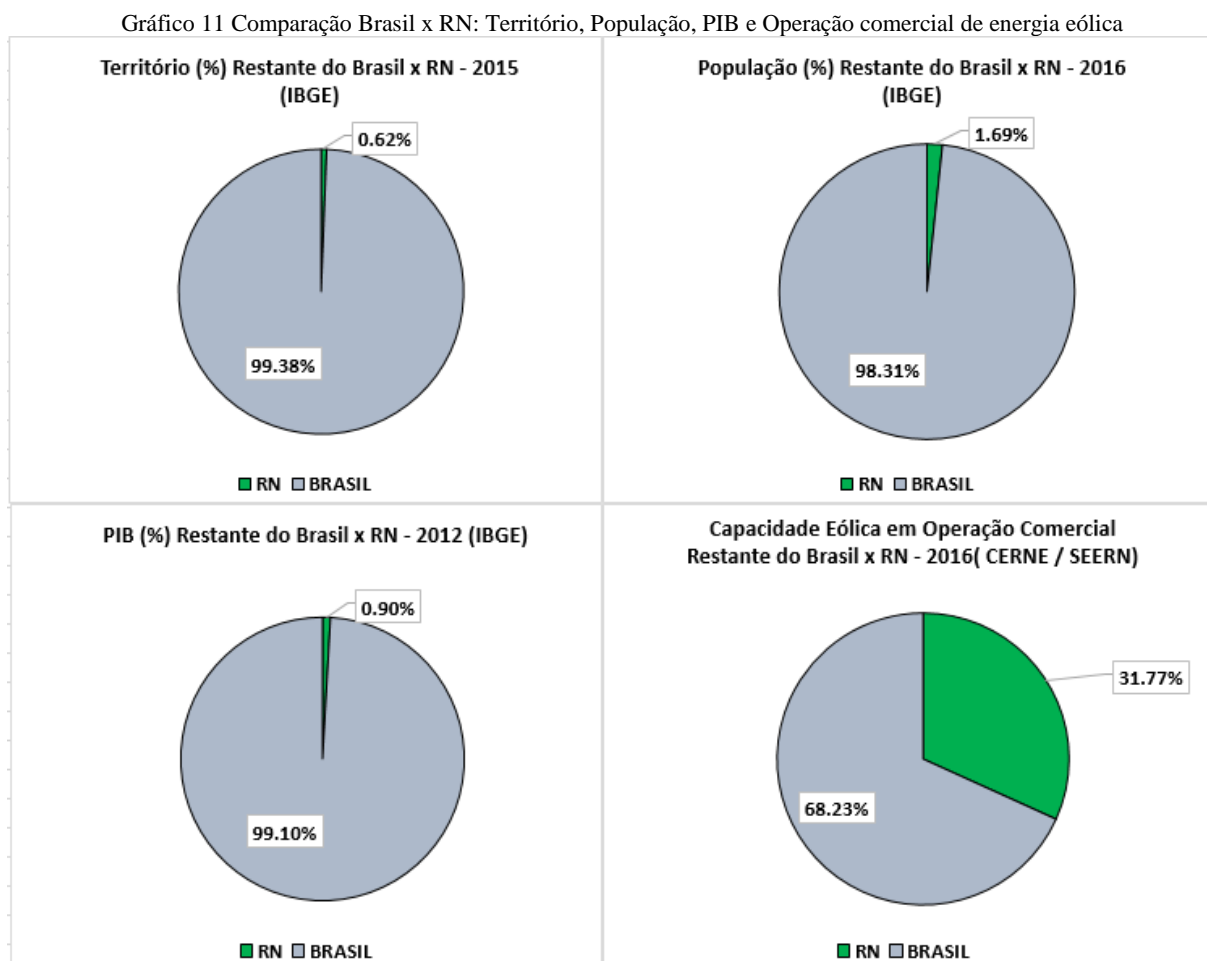
Gráfico 10 Capacidade total de potência contratada/outorgada (construção não iniciada) por UF



Fonte: Centro de Estratégias em Recursos Naturais & Energia - CERNE; e Sindicato das Empresas do Setor Energético do RN - SEERN

A evolução da energia eólica no Rio Grande do Norte trouxe ao estado a condição de exportador de energia, segundo dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015, feito pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). No ano de 2014, O Rio Grande do Norte teve uma geração de 7011 GWh, um aumento de 86,7% em relação a 2013. No mesmo ano de 2014, o consumo energético do estado foi de 5466 GWh, mostrando a autossuficiência energética em energias limpas, além da diferença ou excedente que é ligada na rede elétrica nacional, deixando o estado numa condição de “exportador de energia”.

O Rio Grande do Norte prova seu panorama de destaque no cenário da energia eólica nacional quando se compara o PIB, território ocupado e produção de energia eólica. O Gráfico 12 a seguir mostra essa comparação.



Fonte: Centro de Estratégias em Recursos Naturais & Energia - CERNE; e Sindicato das Empresas do Setor Energético do RN – SEERN

O panorama de destaque se mostra visível quando percebe-se que o território/população do estado representar cerca de 1% em relação ao Brasil, enquanto operação comercial de parques eólico representa mais de 30 % do todo. O PIB do Rio Grande do Norte representar 1%

do PIB do país, enquanto um terço da energia eólica gerada no país é gerada em solos norte-rio-grandenses é bastante controverso. Esse fato, assim como o fato exposto anteriormente, em que o estado gera mais energia do que consome, apenas enfatizam o fato de que o Rio Grande do Norte deve investir mais na implementação de indústrias dentro do estado, pois o estado tem recurso energético a ser explorado suficiente para elevar o estado em outro patamar econômico no país.

1.2. PROBLEMÁTICA DE PESQUISA

As escolhas das alternativas de engenharia para um projeto são essenciais para este atingir seus objetivos. A problemática do trabalho passa pela avaliação comparativa qualitativa da torre para aerogerador que melhor se encaixe para as condições de um terreno localizado no município de Serra do Mel, no estado do Rio Grande do Norte, entre a torre de aço tubular soldada verticalmente e horizontalmente e as torres de concreto pré-moldadas protendida.

O mercado eólico apresenta outras alternativas para suportes de aerogeradores que não serão analisadas de forma profunda neste trabalho. Essas alternativas variam quanto a modo de execução, ao material utilizado e ao tipo de conexão utilizada no projeto. Além das duas que serão analisadas, existem no mercado a torre tubular de aço com conexão por pinos, as torres de estruturas de aço treliçadas, torre de concreto moldadas *in loco*, torres híbridas de concreto e aço, torres de madeiras, sem contar as variações que cada alternativa passa de projeto para projeto.

Visto isso, o problema de pesquisa é fundamentado, portanto, em uma avaliação comparativa qualitativa entre a torre de aço tubular soldada e a torre de concreto pré-moldada protendida embasada em critérios do âmbito financeiro, logístico e estratégico.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é realizar uma avaliação comparativa qualitativa embasada em critérios econômicos, logísticos e estratégicos entre a torre de aço soldado e a torre de concreto pré-moldado protendido para um parque eólico no município de Serra do Mel, no Rio Grande do Norte.

1.3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Apresentar sucintamente sobre a dinâmica do mercado eólico
- Identificar os critérios a serem analisados para escolha
- Realizar comparações claras entre as torres de aço soldado e torre de concreto pré-moldado escolhidas para cada critério identificado
- Apresentar resultado de avaliação comparativa qualitativa baseado em critérios estabelecidos

1.4. JUSTIFICATIVA

A atual conjuntura na qual as empresas estão inseridas atualmente faz com que a competição domine o mercado. Dessa forma, se destacarão aquelas que melhor gerenciarem seus processos e embasarem devidamente suas decisões e ações. Sendo assim, torna-se bastante atrativo uma boa gestão das informações para a tomada de decisão, independentemente do tamanho da empresa.

Portanto a escolha de uma alternativa de engenharia deve ser embasada em uma avaliação comparativa para que a escolha seja feita de tal forma que seja encontrado a alternativa com menor custo.

As torres de aerogeradores pode chegar a representar 30% do custo total do aerogerador, que por sua vez representam quase 70% do custo total do parque eólico. Portanto, fazer uma escolha precisa desse elemento é essencial para um sucesso do contrato, visto que leilão após leilão as empresas têm sido levadas a apresentar preços de MWh cada vez mais baixos, devido ao enorme aumento da competitividade do mercado eólico no Brasil, sendo considerado um dos mais competitivos do mundo.

1.5. DINÂMICA DO MERCADO EÓLICO

Um empreendimento de energia sempre gira em torno da concessão que a União fornece a um empreendedor de explorar seus recursos energéticos. Os termos de concessão de geração de energia são diferentes quando se compara um parque eólico e uma hidrelétrica.

No caso da hidrelétrica, a união escolhe um local com potencial e coloca em leilão para o empreendedor construir e gerar energia durante o período de concessão. No fim da concessão, a concessão pode ser renovada, mas depois disso os empreendimentos voltam para as mãos da União, que fará novas licitações. Em parques eólicos a situação é um pouco diferente. O empreendedor procura o terreno com grandes potenciais, desenvolve o projeto e

cadastra o projeto em determinado leilão, que ganha o direito de comercializar a energia durante o período de contrato. Ao fim do contrato, o empreendedor continua de posse do parque, podendo fazer contrato de comercialização em ambiente livre, por exemplo. No Brasil, nenhum parque eólico chegou ao fim de contrato ainda.

Diante disso, o fato do empreendedor ter que viabilizar seu investimento cria uma dinamicidade e competitividade no mercado eólico. O empreendedor precisa tanto de precisão e estratégia na busca por um terreno com boas velocidades de ventos, como infraestrutura de transporte, abastecimento de água, acesso próximo à matéria prima que diminuam custos logísticos do parque. Como todo mercado dinâmico e competitivo, existe buscas contínua de melhoria e aumento de eficiência em seus processos, o que estimula por sua vez a procura por avanços tecnológico e estimula o desenvolvimento tecnológico desenfreado, ou seja, avanços tecnológicos contínuos. Uma boa escolha de componentes se faz extremamente necessária na busca de aumento da vida útil do parque, e o interesse em continuar gerando pelo máximo de tempo possível, até mesmo após o período de concessão inicial.

Robbins (2002, p. 441) reforça o pensamento de avanço tecnológico contínuo ao afirmar que “A melhoria contínua se opõe a uma das mais históricas abordagens norte-americanas da administração, que é ver o projeto de trabalho como algo linear, com um começo e um fim. A busca da melhoria contínua gera uma corrida sem linha de chegada.”

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em cinco capítulos, detalhados a seguir:

No primeiro capítulo será apresentado a introdução do trabalho que abrange a contextualização do tema, a apresentação do problema de pesquisa, os objetivos geral e específico, a dinâmica do mercado eólico, além da estrutura de apresentação que este trabalho irá seguir.

No segundo capítulo, será apresentado o procedimento metodológico utilizado para atingir os objetivos apontados.

Já o terceiro capítulo expõe informações sobre as alternativas de torres que serão estudadas.

O quarto capítulo representa, de fato, a avaliação realizada, onde abrange a análise dos critérios estabelecidos. Este capítulo transmite o real desenvolvimento do trabalho.

O quinto e último capítulo traz as considerações finais do trabalho, apresentando as principais conclusões do projeto, com sugestões acerca do tema.

2. MÉTODOS

Este estudo trata-se de uma pesquisa aplicada pois objetiva gerar conhecimento a partir de uma aplicação prática. Foi escolhida uma abordagem qualitativa para se avaliar estrategicamente as alternativas de torres escolhidas. O levantamento de informações foi foram feitas de modo que primeiro seriam feitas as escolhas das torres a serem analisadas neste trabalho e depois a escolha dos critérios a serem avaliados.

2.1. LEVANTAMENTO DE ALTERNATIVAS DE TORRES

A escolha das alternativas de torres a serem analisadas mais profundamente foram as que estão mais presentes no mercado brasileiro, que estão disputando o domínio do mercado. Portanto, foram escolhidas a torre tubular de aço soldado e a torre de concreto pré-moldado, que serão detalhadas e aprofundadas durante o trabalho. Entretanto, existem outras alternativas no mercado eólico mundial, que se diferem em termos de material ou processo de execução, que serão brevemente apresentadas a seguir, além da justificativas delas não terem sido analisadas neste trabalho

A torre de aço tubular pode ser projetada sem soldas especiais, que exigem controle de qualidade rígido e mão de obra qualificada. Essa solução utiliza-se de pinos para fazer as conexões de um anel de aço com o outro. Essa alternativa exige a verificação de torque de cada pino durante a construção, além do alto custo de manutenção devido a necessidade de verificação periódica da condição da conexão, além de serem sujeitos a corrosão, principalmente em ambientes altamente agressivo como é o Nordeste brasileiro. Devido a isso, não será analisada neste trabalho. Outra alternativa utilizando de aço na sua estrutura, mas através de solução diferente é a torre treliçada. Devido a motivo semelhante (alto custo de manutenção e por estar presente em ambiente altamente agressivo) não será tema de análise mais aprofundada.

Existe também outro modo de execução da torre de concreto. A torre de concreto pode ser moldada in loco, utilizando-se de formas deslizantes no processo de execução. Esta alternativa tem vantagem por não apresentar junções, uma vez que são executadas de modo contínuo. Entretanto, o alto controle de tecnológico do concreto necessário, além dos altos riscos de fissuração do concreto e outros problemas de execução. Por isso, adicionado a baixa produtividade, foi escolhido não analisar essa alternativa de forma aprofundada.

Outras duas alternativas, consideradas soluções especiais, são a torre híbrida de concreto/aço e a torre de madeira. A primeira está sendo amplamente utilizada nos novos projetos de torre por ter uma eficiência na utilização de material, porém, ainda não foram instaladas aqui no Brasil, e por isso, não será tema de análise aprofundada neste trabalho. A segunda, a torre de madeira, só foi instalada uma única vez como protótipo na Alemanha, por uma empresa alemã chama TimberTower, e por isso não será tema de análise profunda.

2.2. ESCOLHA DE CRITÉRIOS

Os critérios escolhidos para análise foram baseados em decisões de cunho estratégico, logísticos e financeiro.

Em termos de custos, dividimos entre custo de aquisição, que engloba todo o investimento inicial necessário para implantar a torre no local, custo de manutenção, que engloba todos os custos com reparos preventivos e corretivos durante a vida útil do elemento e o custo de desmobilização, que é o custo que se tem para desmontar ou demolir a torre ao fim da sua vida útil ou no fim de um contrato. Em termos logísticos, iremos fazer uma avaliação da facilidade de transporte do elemento ou das limitações impostas no transporte da torre de aço ou torre de concreto. Em termos estratégicos, as reflexões que serão feitas giram em torno da facilidade de encontrar fornecedores da matéria prima ou de elementos constituintes das soluções analisadas, reflexão acerca da diferença estruturais entre as duas alternativas, tanto em termos de durabilidade quanto em termos de desempenho e uma última reflexão acerca da possibilidade de fazer um *repowering* no parque.

3. ALTERNATIVAS DE TORRES PARA AEROGERADORES

As alternativas que serão estudadas no trabalho serão as torres de concreto pré-moldado protendido e as torres de aço tubulares soldadas. A escolha se deu devidos às duas soluções serem as que mais são utilizadas no mercado brasileiro.

3.1. TORRE DE AÇO TUBULAR COM SOLDA VERTICAL E HORIZONTAL

A torre de aço com solda vertical e horizontal consiste em chapas de liga metálica especial, liga esta comum em torres para aerogeradores, que são fletidas em uma forma circular e soldadas longitudinalmente (Figura 4). Esses cilindros são conectados um no outro através de

soldas horizontais para formar um tramo de torre, que varia entre 20 e 30 metros em seu comprimento. Cada tramo de torre possui pequenas flanges em suas extremidades, e são conectados por parafusos estruturais. A extremidade inferior é feita de forma que se conecte com a fundação, assim como a extremidade superior do último tramo, feito para receber a nacelle.

Figura 4 Pintura de Torre tubular de Aço soldadas longitudinalmente e transversalmente



Fonte: ALMEIDA, P. – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2008

Este tipo de torre tem sido a mais utilizada no mundo (Engstrom et al., 2010). O aço possui uma grande relação resistência/peso (Way, 2014). Dentre as vantagens está a rapidez de montagem, por ter apenas quatro ou cinco tramos a serem levantados para construção. Entretanto, as torres metálicas tubulares têm como desvantagem a dificuldade de transporte. Este tipo possui um custo competitivo até 80 metros de altura, pois a partir daí se faz necessária o aumento da espessura da chapa, além do aumento do diâmetro, consequentemente elevando o custo da torre (World Steel Association 2012). As questões estratégica, logística e de custo serão tema da análise realizada neste trabalho.

No Brasil, a torre metálica tubular também é líder do mercado, apesar de se ter uma grande dificuldade estratégica para fabricação do elemento em solos brasileiros, requisito primordial para conseguir um financiamento pelo FINAME, Agência Especial de Financiamento Industrial, conquista essa que é determinante para a viabilidade do empreendimento. O fato dela ser a mais utilizada no Brasil se deve ao fato de todas tecnologias da energia eólica ter vindo da Europa e EUA, países onde é mais viável na maioria dos casos a

solução de torre metálica que a de concreto, salvo o aumento da altura como dito anteriormente. Este trabalho fará uma comparação estratégica/financeira entre as torres metálicas tubulares e torres de concreto pré-moldado, por se tratarem hoje das mais utilizadas no mercado.

3.2. TORRE DE CONCRETO PROTENDIDO

A torre protendida consiste no pré-tensionamento de cordoalha de aço com alto módulo de elasticidade para garantir que o sistema estrutura concreto armado e cabos ganhem rigidez e ductilidade para combater as cargas dinâmicas impostas pelo vento.

O concreto protendido se encaixa muito bem para o suporte de aerogeradores, devido à alta rigidez e ductilidade. O acréscimo de rigidez resulta em diminuição da deflexão lateral causada pela ação dinâmica que o vento causa na torre. Os componentes da nacelle vão sofrer menos com a vibração devido à alta rigidez do sistema estrutural (Way 2014).

A torre de concreto tem ganhado mais espaço no mercado devido a tendência mundial para aumento da altura do aerogerador. A necessidade vem devido a evolução da tecnologia de turbinas, fabricada cada vez maiores e com maior potência nominal, que exigem alturas maiores do hub. O aumento da potência da turbina traz consequências no custo da energia, que diminui na medida que a potência aumenta.

As propriedades físicas do concreto garantem uma alta resistência a compressão, porém apenas 10% desta resistência a compressão é garantida quando se trata da resistência a tração. O ganho de resistência a tração ocorre com a incorporação de barras de aço longitudinais, formando o concreto armado. Porém, em uma torre para energia eólica, o concreto apenas resiste a pressão (Elforsk 2010). A absorção das tensões é feita através do pré-tensionamento de cordoalhas, formando um sistema estrutural de concreto pré-tensionado. As cordoalhas podem ser colocadas tanto internamente à torre, quanto na parte externa da parede de concreto, solução esta que facilita a inspeção das cordoalhas.

As torres de concreto pré-tensionadas podem ser tanto executadas *in loco*, através de formas deslizantes, como pré-moldadas, que são pré-fabricadas e montadas similarmente a torres de aço.

3.2.1. Torre de concreto pré-moldado protendido

O uso de elementos de concreto pré-moldados para suporte de aerogeradores se tornou popular devido à alta rigidez e facilidade de transporte deste tipo de alternativa. As fábricas dos

elementos pré-moldados podem ser tanto dentro da obra, caso este que a logística de transporte é facilitada, como fora da obra. Neste último caso, os projetos são feitos para que não se precise de carretas especiais e por isso mais custosas para o transporte das peças. Elas podem ser divididas em aduelas para formar o cilindro cônico (Figura 5) ou elementos planos e curvos, dependendo do formato da torre em questão.

Figura 5 Processo de fabricação de torres pré-moldadas e torre montada



Fonte: Revista Concreto Ibracon n.75

As torres de concreto pré-moldada podem ser projetadas de inúmeras maneiras diferentes. As mais utilizadas foram geralmente formadas pela montagem de em média 20 a 25 anéis de 3 a 5 metros cada, dependendo da altura da torre, e um segmento de aço que promove a ligação da nacelle com a torre. Os anéis inferiores geralmente são formados por dois semicírculos que são pré-montados na plataforma antes de serem montados. Outro projeto de torre que tem ganhado bastante espaço no mercado é com quatro grandes tramos, em torno de 20 metros de comprimento cada, e um segmento final de aço, comum a todas as torres de concreto. Todos os tramos são formados por aduelas, que são pré-montadas para formar o anel circular, para depois ser montada a torre. Esse último projeto tem a vantagem de ter menos tramos para serem montados, diminuindo o tempo de montagem. Apesar dos anéis serem muito

mais pesados, os guindastes não variam pois a escolha do equipamento ideal se dá muito mais pela definição da altura do que pelo peso propriamente dito.

Outro tipo de torre que merece destaque é uma torre projetada por uma empresa do Rio Grande do Norte. A DTS (Dois A Tower System), formada pela Dois A engenharia e T&A Pré Fabricados em conjunto com a ATS – Advanced Tower System. A torre é fabricada com um concreto de ultra alta performance chamado Ductal, um material de alta tecnologia que combina uma matriz mineral de ultra alta performance com fibras metálicas ou poliméricas. Essa tecnologia traz um ganho de 300 % de resistência a compressão comparado com uma estrutura de concreto pré-moldado convencional, com uma redução de peso de aproximadamente 50 %.

A torre de concreto pré-moldado tem uma vantagem de ter uma fábrica com certa mobilidade, que pode ser facilmente desmobilizada e mobilizada de um projeto para o outro. Isso faz com que os custos com transportes sejam amplamente minimizados, pois a fábrica é instalada no local da obra.

Uma outra grande vantagem é a facilidade de aquisição de matéria prima para fabricação dos segmentos. No Brasil, não existe nenhuma restrição no mercado quanto aos fornecedores, pelo contrário, o que existe é um mercado competitivo que facilita e traz benefício para quem consome em termos de qualidade e custo. Além disso, a matéria prima utilizada na fabricação das torres pré-moldadas é em sua grande maioria de origem local, trazendo uma enormidade de benefício para a população onde a usina está sendo instalada.

Comparando com a torre de concreto com molde deslizante, a torre com elementos pré-moldados consegue ter um controle da qualidade do concreto muito maior, por se tratar de um elemento fabricado. Muito por causa disso, o retrabalho das peças de concreto pré-moldado é bem menos que no caso de torres moldadas *in loco*.

Devido a sua rigidez, e por isso possui um bom comportamento quando sujeitas a cargas dinâmicas, as torres de concreto se tornam eficientes estruturalmente quando se precisa atingir grandes alturas. Portanto, visto a tendência de aumento das torres, como foi dito anteriormente, a torre de concreto sai na frente neste quesito.

Muito devido ao grande desempenho estrutural e logístico quando se leva em consideração um panorama brasileiro, a torre de concreto pré-moldado está entre as que dominam o mercado brasileiro, e por isso será tema de análise neste trabalho junto com as torres de aço tubulares.

4. AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS

A avaliação comparativa realizada neste trabalho foi feita embasado em critérios, econômicos, estratégicos e logísticos. Foi realizada uma abordagem qualitativa dos critérios estabelecidos, indicando os prós e contras das torres de aço tubular e torrs de concreto pré-moldada protendida para cada critério. Os critérios estabelecidos foram os aspectos logísticos, o desempenho estrutural, matéria prima, como critérios do âmbito estratégico logístico, e os custos de aquisição, que englobam o custo com material, custo de transporte e custo de montagem. Além desses três, os custos com operação e manutenção e de desmobilização compõem os critérios do âmbito econômico-financeiro.

Antes de análise propriamente dita, foi discutido dois aspectos importante a serem tratados antes dessa análise, que é como é composto o custo na energia eólica e sobre a tendência mundial de desenvolvimento de torres altas.

Após realizada análise de critérios, serão abordados os resultados das análises feitas, discutindo as conclusões de cada critério.

4.1. ASPECTOS INTRODUTÓRIOS

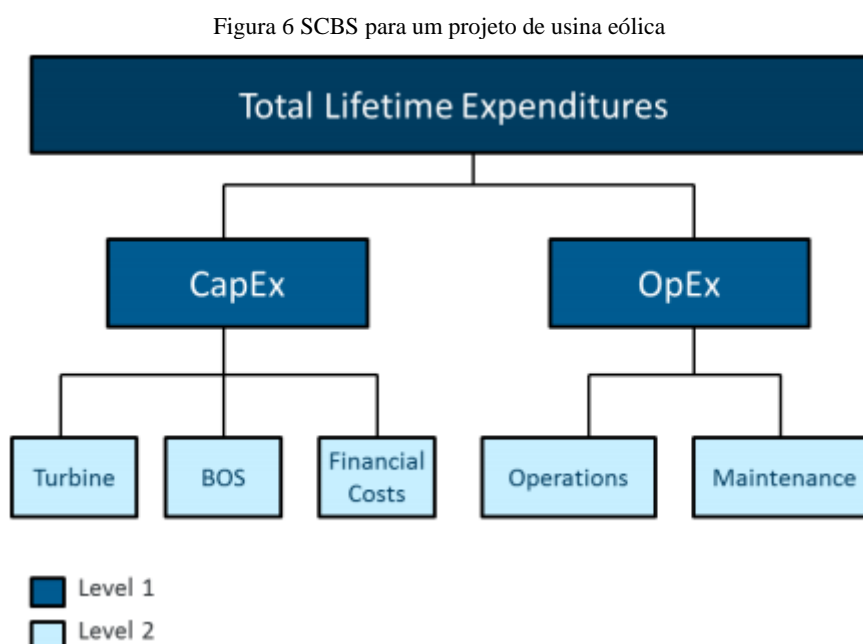
4.1.1. Custos de um projeto de usina eólica

O custo de um projeto de energia eólica deve ser calculado de modo que considere o custo total do projeto, durante todo seu período de geração. Portanto todos os gastos durante a vida útil do parque devem ser contabilizados. As concessões de comercialização no ambiente regulado são feitas geralmente com duração de 20 anos, variando em alguns contratos. Durante este tempo, o parque possui gastos operacionais e de manutenção, além do gasto inicial na implantação do parque. Para se chegar no custo com um suporte para o aerogerador, o projeto deve ser dividido em níveis de detalhamento de custos.

Um instituto de pesquisa de energias renováveis dos Estados Unidos, a NREL – National Renewable Energy Laboratory, propôs um SCBS – *System Cost Breakdown Structure* de um projeto de parque eólico. Um SCBS permite a visualização do projeto em forma um esquema de níveis de detalhamento de custos. O NREL dividiu o custo total da vida útil do projeto, ou *Total Lifetime Expenditures* em termos de *capital expenditures* (CapEx) e *operational expenditures* (OpEx).

O CapEx engloba todo o capital gasto na implantação do projeto. Ele é dividido em *Turbine*, que engloba todos os componentes do aerogerador, inclusive a torre, em *Balance of the System* (BOS), que engloba toda a parte de infraestrutura do parque, incluindo a mobilização, acessos, plataformas, linhas de transmissão, além do setor de engenharia e planejamento. O CapEx também é dividido em *Financial costs*, que trata dos custos com financiamento do dinheiro investido.

O OpEx trata de custos durante a o período de operação do parque. O OpEx é dividido entre custos com operação do parque, que engloba a operação com os softwares do aerogerador e da subestação, e os custos de manutenção, que englobam as manutenções preventivas e corretivas do aerogerador. A parcela de contribuição da manutenção das torres em comparação com a nacelle é pequena, e por isso não ocorre a separação dos custos até este nível de detalhamento. A Figura 6 mostra o SCBS proposto pela NREL.

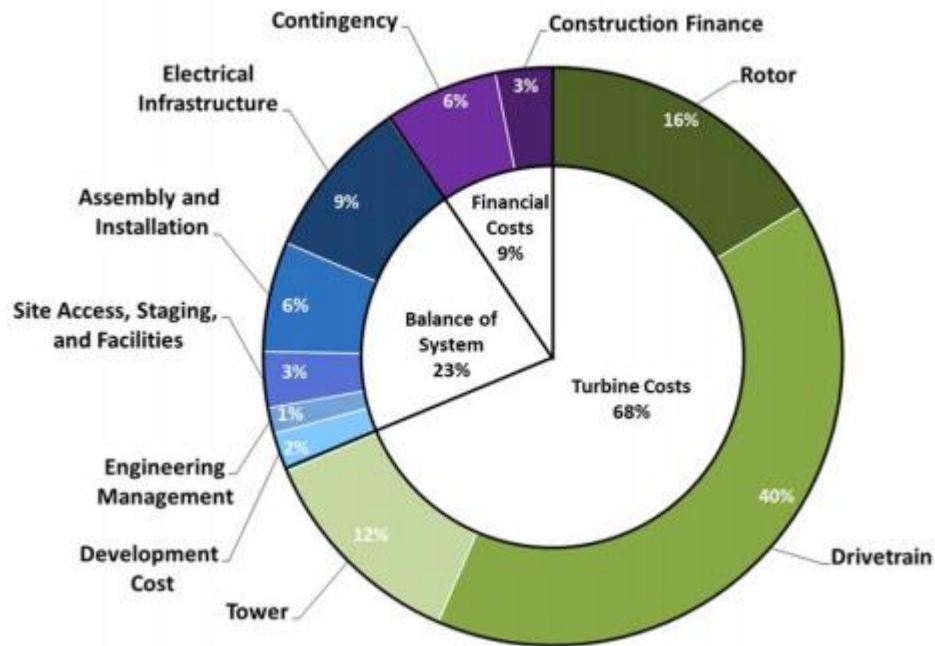


Fonte: NREL – *National Renewable Energy Laboratory*

A NREL realizou também um level 3 de detalhamento dos custos. Para isso, utilizou-se um parque eólico no interior dos Estados Unidos como base, com aerogeradores de 1,91 MW de potência nominal, para realizar um cálculo do LCOE, *levelized cost of energy*, de cada componente do level 3 do SCBS e encontrar quanto ele representa no todo. LCOE é uma relação do valor presente do custo total durante a vida do parque e o valor presente de toda a energia gerada durante o mesmo período, em megawatts por hora.

O resultado encontrado foi que 68 % do custo de um projeto é do aerogerador, e a torre do aerogerador representa aproximadamente 12 % do custo total do projeto. Isso demonstra a importância que este elemento tem no projeto, e portanto a necessidade de ter o conhecimento e avaliações de qual melhor alternativa de suporte de aerogerador para cada projeto em questão. O Gráfico 13 mostra a contribuição de cada componente do projeto para o custo total.

Gráfico 12 Porcentagem de cada componente do custo no custo total



Fonte: NREL - National Renewable Energy Laboratory

A Tabela 2 mostra os valores de LCOE para cada componente do projeto em questão de forma sintética.

Tabela 2 Valores de LCOE para um projeto no interior do EUA

	1.91-MW Land-Based Turbine \$/kW	1.91-MW Land-Based Turbine \$/MWh
Rotor Module	282	8
Blades	169	5
Pitch assembly	65	2
Hub assembly	48	1
Nacelle Module	695	21
Nacelle structural assembly	139	4
Drivetrain assembly	235	7
Nacelle electrical assembly	283	8
Yaw assembly	38	1
Tower Module	208	6
TURBINE CAPITAL COST	1,185	35
Development Cost	32	1
Engineering Management	19	1
Foundation	58	2
Site Access and Staging	48	1
Assembly and Installation	43	1
Electrical Infrastructure	150	4
BALANCE OF SYSTEM	349	10
Market Price Adjustment	39	1
Construction Financing Cost	50	2
Contingency Fund	105	3
FINANCIAL COSTS	194	6
TOTAL CAPITAL EXPENDITURES	1,728	51

Fonte: NREL - *National Renewable Energy Laboratory*

Uma das grandes peculiaridades de um projeto eólico é o capital inicial a ser investido, se comparado com usinas tradicionais de combustíveis fósseis. De acordo com a *European Wind Energy* (EWEA), aproximadamente 75 % do custo total de um projeto é atribuído ao capital inicial, que inclui o aerogerador, a torre, a negociação do terreno, fundações, linhas de transmissão e outros gastos necessários à implantação do parque. Em comparação, as usinas térmicas têm baixo capital inicial a ser investido relativamente, pois os custos com a operação da usina e manutenção constitui cerca de 40 a 70 % do custo total da usina durante sua vida útil, variando de projeto para projeto.

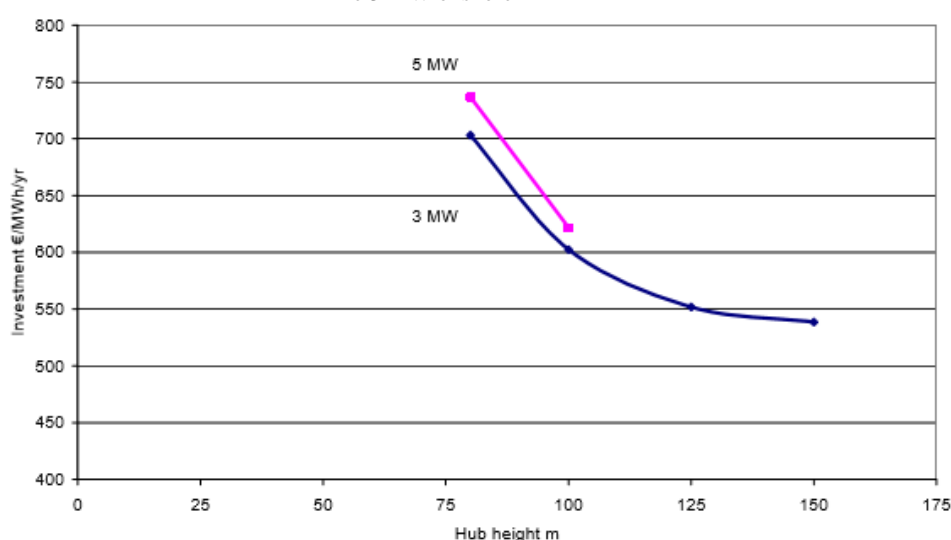
4.1.2. Tendência do desenvolvimento de torres altas

O mercado da energia eólica é muito recente no mundo. Os primeiros aerogeradores implantando para operações comerciais foram nos anos 80 na Dinamarca. No Brasil, esse mercado é ainda mais recente, com o grande crescimento tendo ocorrido a partir de 2009 com o surgimento dos leilões de comercialização de energia. Nesse período, os avanços tecnológicos

têm ocorrido de forma muito rápida, e estes avanços tecnológicos levam a necessidade de desenvolvimento de torres mais altas. A tendência deste desenvolvimento se deve a alguns fatores do desenvolvimento do mercado eólico e de avanços tecnológicos.

O desenvolvimento tecnológico dos aerogeradores levaram a fabricação de turbinas com potência nominal maior, e portanto, maior capacidade de gerar energia. Nos Estados Unidos, a média de potência nominal dos nos aerogeradores implantados no ano de 2014 foi de 1,9 MW, 172% maiores do que em 1999, de acordo com o *2014 Wind Technologies Market Report*, escritos por Wiser e Bolinger. Esses aerogeradores precisam de ventos mais fortes para gerar esse acréscimo de energia. Ventos mais fortes, com maior velocidade e mais constantes são encontrados em maiores altitudes. Esse é um dos fatores que cria a necessidade do desenvolvimento de torres mais altas. A média de altura que os aerogeradores alcançaram em novos projetos em 2014 nos Estados Unidos é de 82,7 metros, 48% maior do que em 1999 (Wiser and Bolinger, 2014). Como podemos ver no Gráfico 14, considerando um parque eólico no sul da Suécia, onde o eixo y é o investimento por MWh gerado por ano e o eixo x é a altura do aerogerador, para uma mesma máquina de 3,0 ou 5,0 MW de potência nominal, o aumento da altura do aerogerador traz uma diminuição no custo da torre por unidade de geração, o que explica a busca por turbinas cada vez maiores e com maior capacidade de geração.

Gráfico 13 Decréscimo de investimento por MWh gerado em um parque eólico na Suécia, turbina 5 MW Offshore e 3 MW onshore



Fonte: Engstrom et al., 2010

Essa diminuição do custo por unidade de geração se deve pelo fato de que a turbina encontra ventos com mais velocidade e mais constantes, e portanto conseguem trabalhar em sua potência nominal por mais tempo, ou seja, aumentando o fator de capacidade. Fator de

capacidade é a relação entre o quanto a máquina gerou e o quanto ela pode gerar. A Tabela 3 mostra o aumento da velocidade do vento, o quanto se gera a mais e o aumento da receita com o aumento da altura do aerogerador na África do Sul, durante os anos de 2011, 2012 e 2013.

Tabela 3 Acréscimo de energia gerada com o aumento de altura em um parque na África do Sul

Ano	Altura	Média anual de velocidade do vento (m/s)	Acréscimo de velocidade (%)	Energia Gerada (MWh)	Acréscimo de energia gerada (%)
2011	80	8,71	0.00%	13136	0.00%
	100	8,97	2.91%	13593	3.48%
	120	9,19	5.42%	13967	6.33%
2012	80	8,27	0.00%	13199	0.00%
	100	8,53	3.18%	13666	3.54%
	120	8,74	5.77%	14025	6.26%
2013	80	8,91	0.00%	13930	0.00%
	100	9,20	3.21%	14422	3.53%
	120	9,43	5.84%	14801	6.25%

Fonte: Way 2014, adaptado

A razão pela qual os ventos se tornam melhores em grandes alturas é a diminuição das turbulências. Principalmente em terrenos inseridos em florestas, o vento de baixas altitudes é muito turbulento por ter o contato com a vegetação, o que atrapalha a constância e diminui a velocidade dos ventos. A vegetação da área estudada neste trabalho é predominantemente caatinga, uma vegetação rasteira, portanto influencia pouco na turbulência dos ventos. Mesmo assim, existe influência e os ventos em grandes alturas são mais fortes e constantes.

Outro fato que justifica a tendência por torres mais altas é a saturação de áreas com bons ventos. Nos Estados Unidos, os terrenos disponíveis hoje em dia não possuem bons ventos para serem explorados. As torres altas estão dominando esse mercado, em busca de ventos mais fortes e constantes a grandes alturas. O aumento do diâmetro do rotor também influencia positivamente na busca por locais com ventos com baixa velocidade.

Portanto, pode-se constatar pelo que foi dito que existe uma tendência de cada vez mais se projetar e implantar torres mais altas. Por causa disso, como vai ser explicado mais para frente, as torres de concreto têm uma enorme vantagem para com as torres metálicas tubulares por não ter limitações em termos de viabilidade do projeto de torres altas.

4.2. CRITÉRIO LOGÍSTICO

Este critério de análise escolhido consiste em uma escolha de cunho estratégico e financeiro. Esta análise consiste em estabelecer uma comparação entre a logística e limitações de transporte da torre de aço tubular e a torre de concreto pré-moldada.

Primeiramente, temos que levar em consideração viabilidade de mobilidade da fábrica dos elementos formadores das torres. No caso da torre de aço, é inviável a mobilização de uma fábrica de torres metálicas determinado parque eólico que esteja sendo construído. Essa fábrica necessariamente precisa estar próxima a portos, para que seja diminuído os custos de transportes das chapas de aço, matéria prima para fabricação da torre. Além disso, a fabricação de uma torre metálica exige isolamento do meio externo em quase todos os processos. Portanto, a estrutura exigida para se montar uma fábrica é custosa, pois deve ser isolada com estrutura e painéis metálicos para garantir o controle de qualidade. Essa restrição faz com que geralmente as torres metálicas tenham que ser transportadas em grandes distâncias, elevando seu custo, além de haver restrição quanto à altura da torre, sobre a qual vai ser falado mais adiante.

Já no caso da fábrica dos elementos pré-moldados da torre de concreto, há viabilidade na sua implantação dentro ou próximo à obra. Este tipo de fábrica não precisa ter o mesmo cuidado com isolamento como se tem numa fábrica de elementos metálicos. As fábricas de concreto geralmente se utilizam de grandes tendas ou lonas, sustentados por um “esqueleto” de aço. Os custos de transportes das torres de concreto são elevados devido ao número de segmentos que forma a torre, mesmo quando a fábrica se encontra instalada próxima ou dentro da obra. As torres metálicas em sua grande parte possuem de 4 a 6 tramos a serem transportados, pois parte dos segmentos são soldados horizontalmente em fábrica. As torres de concreto são transportadas segmento a segmento, por isso o custo maior de transporte, considerando uma mesma distância.

As torres de aço têm uma outra grande desvantagem perante as torres de concreto em termos logísticos. Como foi falado anteriormente, existe a tendência do desenvolvimento de torres cada vez mais altas, tanto para explorar locais com ventos fracos, precisando assim atingir maiores alturas, quanto para o aumento da capacidade de geração. Visto isso, chega-se à conclusão de que uma desvantagem das torres de aço é o fato de terem uma limitação ao atingimento de grandes alturas. Essa limitação existe pois ao se elevar a altura de uma torre, aumenta-se os efeitos da flambagem. Para combater à flambagem, deve-se aumentar o diâmetro da base e espessura da parede para garantir a rigidez necessária. A limitação nas torres metálicas ocorre porque o limite de diâmetro para que a torre consiga ser transportada em rodovias é de 4,5 metros (Suécia). Em alguns países, esse limite pode cair para 3,5 metros (Engstrom et al.,

2010). No Brasil, esse limite é de 4,3 metros (Chastre, 2014). Por isso, o aumento do diâmetro passa a ser um problema como solução.

Esse aumento do diâmetro da base pode ser substituído por um aumento da espessura da chapa, entretanto a torre se torna inviável economicamente. O aumento da espessura da chapa gera grandes impactos no peso da estrutura, passando a se ter um custo superior com material. Foi feita pela Elforsk, uma empresa desenvolvimento de pesquisas de engenharia, uma análise comparativa em relação ao ganho de peso da torre variando seu diâmetro e espessura de chapa. Como se pode ver na Tabela 4, em uma torre de 150 metros, o diâmetro da base mais econômico seria de 5,8 metros, na qual se utilizaria uma chapa de 43 milímetros. Entretanto, com a restrição do diâmetro em 4,5 metros, a torre teria um aumento de 10 % em seu peso, e a chapa utilizada seria de 75 milímetros. As fábricas de chapa de aço começam a encontrar mais dificuldades em fabricar chapas a partir de 50 milímetros, elevando assim os custos de fabricação, e assim refletindo no custo final da torre.

Tabela 4 Aumento do peso da torre e da espessura da chapa com aumento de altura, para diferentes diâmetros

Com restrição de diâmetro em 4,5 metros		
Altura do HUB (m)	150	175
Diâmetro da base (m)	4,5	4,5
Espessura de chapa na base (mm)	75	*
Peso(t)	610	*
Sem restrição de diâmetro		
Diâmetro da base (m)	5,8	6,0
Espessura de chapa na base (mm)	43	46
Peso(t)	551	724
* Espessura de chapa não comercial		
Varição de peso (%)	10%	-

Fonte: Engstrom et al., 2010 Adaptado

As torres de concreto pré-moldadas não encontram esse tipo de restrição. Nas ocasiões onde não se encontra viabilidade na instalação da fábrica de torre na obra, a torre tem que ser transportada de alguma fábrica mais próxima, assim como acontece com as torres de aço. Porém, as torres de concreto possuem uma flexibilidade maior para se vencer a limitação das rodovias pois podem ser divididas em aduelas menores que o limite, podendo assim ser transportadas facilmente. As aduelas são pré-montadas na plataforma ao lado da torre.

A Tabela 5 demonstra um resumo dos aspectos discutidos e a torre que possui vantagem nesse quesito.

Tabela 5 Tabela de aspectos discutidos do Critério Logístico

#	Aspectos discutidos	Vantagem para	Observações	
			Torre de Aço	Torre de Concreto
1	Mobilidade da fábrica	Torres de Concreto	Não possui viabilidade para mobilização de fábrica	Existe viabilidade na mobilização da fábrica para o local da obra
2	Limitação de altura	Torres de Concreto	Possui limitação de 4,3 metro de diâmetro, limitando a altura em aproximadamente 80 metros	Não existe limitação de altura por problemas logísticos

Fonte: Autor

4.3. DESEMPENHO ESTRUTURAL

As torres eólicas possuem diferenças no desempenho estrutural na medida que se varia o material por ela utilizado. As torres estão sujeitas a cargas dinâmicas impostas pelo vento, que causam movimentos cíclicos no elemento. Devido a essa particularidade, as torres eólicas são bastantes exigidas à fadiga durante toda sua vida útil (Way, 2014). Além disso, um dos critérios mais importantes no cálculo das torres é deixar a frequência natural da torre fora da zona de frequência das pás dos aerogeradores passando pela torre. Em um contexto geral, as torres metálicas sofrem mais dificuldades para ficar com frequência natural fora dessa zona de frequência de passagem das pás.

A frequência natural é a frequência em que o objeto vibra ao ser estimulado por ação qualquer (Way, 2014). No momento em que a pá passa pela torre no seu movimento de operação, o aerogerador por uma fração do tempo é menos exigido. Esse movimento ocorrendo repetidas vezes causa uma oscilação na torre. O que tem que ser evitado é que a frequência natural da torre acabe coincidindo com a faixa de frequência de uma pá da turbina rotacionando, podendo causar ressonância entre elas. O fenômeno de ressonância entre as frequências naturais das torres e a frequência com que a pá passa pela torre causa grandes acréscimos de deformação da torre e aumento dos níveis de vibração. Os efeitos da ressonância geralmente levam ao

aumento e a antecipação de danos por fadiga ou no pior caso, pode levar a ruptura da torre (Way, 2014).

As torres metálicas a partir de 90 e 100 metros de altura sofrem com baixas frequências naturais, por isso são mais suscetíveis ao fenômeno de ressonância. O problema é agravado pelo fato das torres, particularmente as de aço, terem um baixo nível de amortecimento estrutural devido às paredes serem pouco espessas. A frequência natural também diminui na medida que se aumenta a altura da torre (Way, 2014).

O que pode ser modificado nas torres para se obter um acréscimo da frequência natural, considerando torres de aço, e sem modificar o modelo do aerogerador nem a altura em que o mesmo se encontra, são o peso ou a robustez do elemento e o diâmetro da torre. Entretanto, como mencionado na análise do aspecto logístico, as torres de aço têm limitação quanto aumento do diâmetro da base, sendo limitado em 4,5 metros. Portanto, a única ação em projeto que pode ser tomada é o aumento da espessura da chapa (Way, 2014).

Para que ocorra o atendimento do requisito de cálculo em relação à ressonância, as espessuras da chapa sempre são elevadas além do necessário para combater a resistência à flambagem. Aumentando a espessura da chapa nas seções próximas à base tem o maior efeito para aumentar a frequência natural do elemento, devido ao aumento de rigidez da torre, ficando assim longe da faixa de frequência em que a torre pode ser afetada por efeitos de ressonância (Way, 2014).

Por sua vez, as torres de concreto não apresentam níveis de frequências naturais próximos a faixa de frequência das pás passando pela torre. A protensão do concreto em torres é uma solução estrutural que se adequa bem aos esforços cíclico exercidos pela ação dos ventos nos aerogeradores. O concreto protendido possui alta rigidez estrutural atrelada a alta ductilidade, o que resulta em um aumento de sua frequência natural e diminuição das deformações laterais e dos desgastes causados por vibrações excessivas (Way, 2014).

Outra consequência positiva que as torres de concreto trazem em termos de desempenho estrutural é a redução de níveis de ruídos durante a geração, devido ao efeito de amortecimento do concreto (Fabcon, 2013).

Em relação às deflexões ou deformações das torres imposta pela ação dos ventos, não existem limitações impostas pelas normas mundiais de projeto para torres eólicas. Entretanto, os fabricantes geralmente especificam esse limite. As deformações excessivas devem ser evitadas afim de limitar o dano por fadiga, assim como garantir que os componentes da Nascelle não sofram com o movimento da torre. A Nascelle é a estrutura que comporta todos os

componentes elétricos e mecânicos responsáveis pela geração de energia. Essa estrutura se localiza no topo do aerogerador.

As falhas graves por fadiga podem ocorrer no concreto por esmagamento ou punção. No aço, a falha é por deformação não plástica, o que acaba comprometendo as propriedades de resistência do material. Pode acontecer também falhas em ligações mal feitas (Way, 2014).

As torres de concreto não possuem problemas relativos a deformações excessivas, por terem paredes espessas. As torres de concreto são extremamente rígidas portanto as deformações são muito menores que nas torres metálicas (Way, 2014). Muito devido a isso, as torres de concreto possuem uma vida útil maior do que as torres de aço. As torres de concreto, dependendo do cobrimento que se adote para a estrutura, podem chegar a uma vida útil de 50 anos, servindo para até duas gerações de turbina, com óbvia economia de custo, enquanto as torres metálicas possuem uma vida útil por volta de 20 anos, dependendo da torre (Engstrom et al., 2010).

As torres de aço, principalmente após 100 metros de altura, possuem uma deflexão maiores que as torres de concreto por terem paredes menos espessas. Portanto, as torres de aço precisam de espessura ainda maior de suas paredes para também cumprir com a rigidez necessária para combater as deformações excessivas.

Uma pesquisa da Stellenbosch University, da África do Sul, realizada pelo pesquisador Andrew Christopher Way em 2014 fez o cálculo estrutural de torres eólicas em concreto pré-moldado protendido, em aço tubular soldado verticalmente e longitudinalmente e híbrida parte em concreto e parte em aço com alturas de 80, 100 e 120 metros. No cálculo foram considerados dados de ventos de uma região chama Napier, na África do Sul, cumprindo as normas locais e padrões internacionais do mercado eólico. A turbina considerada para cálculo foi o modelo V112-3MW fabricada pela empresa dinamarquesa Vestas. A Tabela 5 mostra as deflexões encontradas para as torres de aço e concreto de acordo com o cálculo realizado, mostrando que a torre de metálicas defletem aproximadamente três vezes mais do que as torres de concreto defletem, em mesmas condições.

Tabela 6 Comparação entre deflexão no topo das torres de aço e concreto

Altura (m)	Tipo de torre	Deflexão no topo da torre (m)	Porcentagem da deflexão em relação à altura (%)
80	Aço	0,92	1,15%
	Concreto	0,371	0,46%
100	Aço	1,35	1,35%
	Concreto	0,6	0,6%
120	Aço	1,48	1,24%
	Concreto	0,99	0,825%

Fonte: Way (2014) adaptado

A Tabela 7 demonstra um resumo dos aspectos discutidos e a torre que possui vantagem nesse quesito.

Tabela 7 Aspectos discutido no critério Desempenho Estrutural

#	Aspectos discutidos	Vantagem Para	Observações	
			Torre de Aço	Torre de Concreto
1	Desgaste por fadiga	Torres de Concreto	Maior desgaste por fadiga	São menos sujeitas aos desgastes por fadiga por possuírem maior rigidez
2	Ressonância	Torres de Concreto	Possui faixa de frequência natural próxima da frequência de passagem das pás nas torres	Frequência natural alta longe da faixa de frequência da passagem da pá pela torre.
3	Deflexão	Torres de Concreto	Deflexão superior que as torres de concreto	Defletem um terço menos que as torres metálicas
4	Vida útil	Torres de Concreto	Vida útil de 20 anos	Tem a possibilidade de atingir uma vida útil de 50 anos
5	Vibrações e ruídos	Torres de Concreto	Maiores níveis de ruído e vibração	Menores prejuízos com ruído e vibrações excessivas

Fonte: Autor

4.4. FORNECIMENTO DE MATÉRIA PRIMA

O sucesso de um produto final em uma cadeia produtiva depende essencialmente de sua matéria prima. Existem uma série de fatores que definem a qualidade de um fornecimento de matéria prima. Distância do local de fabricação do produto, baixo custo, a oferta do material e o cumprimento de prazos de entrega estabelecidos são variáveis que se relacionam entre si e muitas vezes definem o sucesso ou viabilidade de um projeto em determinado local. O baixo custo de um material depende de um mercado competitivo, com alta demanda, o que leva ao aumento de oferta. Um mercado competitivo estimula o aumento da qualidade da matéria

prima, assim como a necessidade de melhoria do nível de serviço, neste caso o cumprimento de prazos de fornecimento estabelecidos, além da necessidade de chegar a preços competitivos. Trazendo para a situação avaliada neste trabalho, as chapas de liga de aço especial para fabricação das torres metálicas são requisitadas por encomenda, enquanto o concreto possui um mercado estabelecido no Brasil, sendo o material mais consumido no Brasil e no mundo (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2013).

Dentre as ligas metálicas especiais de alta resistência utilizada na fabricação das chapas que compõem as torres estão o ASTM A572, A1011/1018 HSLAS-50, EN10025 S355 e NBR6656 LNE380. Essas ligas não possuem uma produção em série no país. Por causa disso, as chapas são fabricadas por encomenda, e por isso possui um custo alto, sem contar com o fato de os compradores serem sujeitos a problemas de prazo, por se tratar de um material que não possui uma produção em larga escala. As siderúrgicas que fabricam essas chapas são limitadas em território nacional, o que torna o mercado pouco competitivo. Algumas das siderúrgicas que dispõem da fabricação dessas chapas de alta resistência são a Usiminas, a Gerdau, a Companhia Siderúrgica Nacional, Belgo Mineira, Acerlomitral, entre outras poucas não citadas.

A pouca oferta nacional da matéria prima causa na maioria dos casos problemas em termos logísticos. O transporte do material geralmente tem que vencer grandes distâncias da siderúrgica até a fábrica que irá fabricar a torre, elevando ainda mais o custo final do material e conseqüentemente da torre eólica. A relação com matéria prima do concreto é diferente, uma vez que existe ampla oferta do material em todo território nacional.

Outro fato que prejudica o mercado de torres eólicas a nível nacional é que as fábricas dão preferência a produção de componentes de mercados como do petróleo e marítimo em detrimento ao mercado eólico. A fábrica Máquinas Piratininga, localizada em Jaboatão dos Guararapes – PE, uma das mais próximas de Serra do Mel – RN, tem como maior mercado a indústria petrolífera, dando preferência a este mercado e portanto postergando prazos de torres eólicas, fato sentido por quem trabalha no setor eólico. Segundo a própria indústria, 70% de seu fornecimento é para o mercado petrolífero e marítimo. Esta fábrica possui a capacidade de produção de no máximo 50 torres por ano, tendo portanto a capacidade produtiva de abastecer apenas pequenos parques.

O reflexo dos custos das chapas de aço reflete na competitividade do mercado de torres metálicas nacionais quando comparado ao mercado internacional destes elementos. As torres de aço chinesas são extremamente competitivas devido à grande demanda existente no país. Com processo produtivo estabelecido, as empresas chinesas fabricantes de torres eólicas

conseguem atingir baixo custo na construção dos componentes. Mesmo sendo importadas, as torres chinesas ficam mais baratas do que as brasileiras para o mercado nacional.

Entretanto, o governo brasileiro, através do Banco Nacional de Desenvolvimento Sustentável, BNDS, possui um sistema de financiamento com juros baixíssimos que estimula a indústria local de componentes para parques eólicos. O FINAME é um financiamento do BNDES feito por intermédio de instituições financeiras credenciadas para produção e aquisição de máquinas e equipamentos novos de fabricação nacional para empresas que estejam credenciadas no BNDES. Segundo normativo do banco, no critério torre para o aerogerador, será enquadrado no financiamento os aerogeradores que tiveram a fabricação de torre no Brasil de pelo menos 70% em peso do material fabricadas no Brasil. A maioria dos projetos de parques eólicos são pelo FINAME, o que faz com que haja estímulo de desenvolvimento da indústria local. Mesmo adquirindo torres mais caras, os benefícios do financiamento com juros baixos superam essa diferença na aquisição das torres. Entretanto, existem empreendedores que fazem financiamento próprio ou através de outra fonte devido ao alto grau de burocracia dos processos do financiamento pelo FINAME. Nestes casos, é mais vantajoso importar as torres eólicas. A análise demora cerca de um ano para ser concluída.

O contexto do mercado do concreto é o oposto do explicitado com a matéria prima das torres metálicas. O concreto é um material com mercado estabelecido no país. Os fatores macroeconômicos e incentivos governamentais possibilitaram o crescimento da construção civil nos últimos anos, que foi particularmente positivo para as concreteiras. Entre 2005 e 2012, enquanto o consumo de cimento avançou mais de 80 %, o aumento do concreto preparado em centrais foi de 180 % (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2013). O crescimento geral da construção civil, principalmente em obras de infraestrutura e habitação, foi o grande responsável pelo aumento da demanda do setor de concreto. Devido a isso, se estabeleceu no país um mercado competitivo no que diz respeito a produção de cimento e concreto, trazendo benefício já discutidos para o setor.

Trazendo para o contexto de torres eólicas, os fabricantes de torres encontram maior facilidade para adquirir a matéria prima para produção do concreto. Na maioria dos locais de implantação de parques, o fornecimento dessa matéria prima é obtido em locais relativamente próximos, resultando assim em um baixo custo de transporte. Sem contar que a o transporte é através de carretas comuns, mais simples que o transporte de chapas de aço, que exigem carretas robustas para escoamento para portos, na maioria das vezes, resultando assim em mais uma vantagem em termos de fornecimento.

Trazendo para a situação em estudo, o município de Serra do Mel no Rio Grande do Norte possui fábrica de torres de concreto instaladas para o atendimento de obras da região. A fábrica em questão possui uma boa localização em relação ao quesito acesso a matéria prima. As matérias primas utilizadas na fábrica são provenientes de jazidas locais. Existem algumas boas jazidas de brita na região, podendo-se destacar as jazidas de Mossoró, a cerca de 40 km de Serra do mel. Esse tipo de matéria prima não apresenta grandes problemas de qualidade, apesar da rigidez do controle de qualidade de fábricas de torres eólicas.

Para o fornecimento de areia, existem jazidas próximas na região como as jazidas de Assú, Porto do Mangue e Pendências, com 66, 50 e 63 km de distância, respectivamente. Entretanto, as jazidas da região não possuem areia de boa qualidade, com presença significativa de matéria orgânica. Geralmente é feito um tratamento do material já na fábrica, que busca soluções como o peneiramento automatizado para diminuir as taxas de matéria orgânica.

O cimento utilizado nas fábricas de torres de concreto para aerogeradores é o Cimento Portland V ou CP-V. A escolha por esse tipo de cimento se dá principalmente por suas propriedades de rápido ganho de resistência, necessário para retirada dos anéis da forma em um curto espaço de tempo. O fornecimento desse material é feito por empresas especializadas em cimentos especiais, e são transportadas por carretas granéis. No caso estudado, a fábrica de cimento CP-V que fornece o material para a fábrica de torres de Serra do Mel é a Mizu, localizada em Baraúna, Rio Grande do Norte.

O fato das torres de metálicas dominarem o cenário nacional de torres eólicos ocorre devido ao fato das fábricas de peças de concreto não conseguirem ainda atender integralmente o mercado eólico. Entretanto, a tendência é que ocorra um estímulo desses fabricantes devido à necessidade do desenvolvimento de torres altas, atrelado às facilidades de acesso a matéria prima.

Portanto, temos como resultado que existem dificuldades estratégicas e de custos em termos de fornecimento de matéria prima para as alternativas de torres metálicas, devido a não produção em larga escala das chapas de aço de liga especial. Em contra ponto, o fornecimento de matéria prima para as torres de concreto é facilitado. A utilização de jazidas locais para as fábricas tem como consequência o desenvolvimento da região onde está inserida a usina, sendo importante se analisado o contexto de benefícios sócio-econômicos para a região. O mercado de pré-fabricados de concreto ainda não consegue abastecer integralmente a demanda de torres, e por isso as torres metálicas são grande maioria no território brasileiro.

A Tabela 8 demonstra um resumo dos aspectos discutidos e a torre que possui vantagem nesse quesito.

Tabela 8 Aspectos discutidos no critério Fornecimento de Matéria Prima

#	Aspectos discutidos	Vantagem para	Vantagem para/Observações	
			Torre de Aço	Torre de Concreto
1	Mercado Estabelecido	Torres de Concreto	Demanda para chapas de liga especial menores se comparada com o concreto	O concreto está inserido em um mercado estabelecido nacionalmente.
2	Acesso à matéria prima	Torres de Concreto	Poucas metalúrgicos fabricam as chapas de liga especial	As matérias primas do concreto são facilmente encontradas em qualquer lugar que for se instalar o parque eólico.
3	FINAME	Torres de Concreto	Aço brasileiro é 30% mais caro que o Europeu	Fácil atendimento de quesitos para obter o financiamento na torres de concreto. As torres metálicas são bem mais caras aqui do que no mercado internacional.
4	Fornecimento local	Torres de Concreto	Poucas metalúrgicos fabricam as chapas de liga especial	Estímulo ao desenvolvimento de empresas locais
5	Domínio de mercado	Torres de Aço	As torres metálicas dominam o mercado atualmente	O mercado de pré-fabricados ainda não tem capacidade de abastecer integralmente o mercado eólico brasileiro

Fonte: Autor

4.5. CUSTO DE AQUISIÇÃO

O custo de aquisição do suporte do aerogerador representa todos os gastos iniciais necessários para se construir, transportar e instalar a torre no local. Esse custo muitas vezes se confunde com o custo total do empreendimento, que leva em consideração toda a vida útil do projeto. Avaliar uma alternativa apenas pelo custo de aquisição é não considerar os gastos que se tem durante a operação do parque. O objetivo deste tópico é fazer uma comparação dos custos de aquisição entre as torres de aço tubular e a de concreto pré-moldado pretendido.

O custo de aquisição foi dividido em três diferentes grupos de custos. O primeiro é o custo com material, custo com o material propriamente dito para fabricação, o segundo é o

custo com transporte, e o terceiro e último se refere aos custos de montagem dos elementos que compõe as torres.

4.5.1. Custo de Material

O custo de material de um suporte de aerogerador parte primeiramente do cálculo estrutural de cada solução. O cálculo estrutural permite encontrar a espessura da parede da torre em cada seção, e portanto conseguiremos encontrar o volume de material utilizado em cada solução, seja ele em liga de aço estrutural especial ou concreto armado. O objetivo deste trabalho é fazer uma avaliação qualitativa entre as soluções. Portanto, não será feito e nem abordado em detalhes o cálculo estrutural dos elementos, e sim fazer a comparação entre as soluções através de duas abordagens: a primeira será feita uma correlação com um estudo feito em 2014 por Andrew Christopher Way, pela Stellenbosch University na África do sul. O estudo mostra os volumes encontrados depois do cálculo estrutural dos elementos em aço e concreto, assim como uma estimativa de custo das duas torres na África do Sul em termos de material. Será mostrado também a diferença entre os custos com materiais das fundações das torres. A segunda abordagem será trazendo para a realidade brasileira, comparando o custo para se adquirir uma torre metálica no Brasil, sem contar transporte e montagem, através de uma cotação real do mercado, e o custo para se fabricar uma torre de concreto, através de uma estimativa de custos dos principais componentes da torre eólica.

Iniciando a comparação pela primeira abordagem, o estudo feito teve o objetivo de encontrar os custos de materiais em torres de aço tubulares, torres de concreto pré-moldado protendido e torres híbridas. Neste trabalho, só iremos fazer a comparação entre as torres de concreto e de aço. Foi utilizada máquinas de potência nominal de 3 MW no cálculo das torres com 80, 100 e 120 metros de altura. Essa comparação é interessante para se conhecer como que cada alternativa evolui em termos de custo de material com o aumento da altura, além de se conhecer qual alternativa atinge grandes alturas de forma mais econômica.

Os dados de ventos do estudo foram obtidos pela Wind Association of South Africa – WASA e se referem a uma cidade chamada Napier. As velocidades de ventos fornecida se referem a ventos até 60 metros de altura, e foram extrapolados para encontrar as velocidades dos ventos para as alturas de 80, 100 e 120 metros.

As dimensões das torres encontradas mostram que mantendo o diâmetro de base das torres de aço tubular em 4,5 metros, devido a limitação no transporte em rodovias, as espessuras das paredes das torres ficam 55 e 75 milímetros nas torres de 100 e 120 metros, respectivamente.

Isso implica em afirmarmos que as torres metálicas começam a se tornar inviáveis em alturas superiores por resultar em chapas muito espessas, aumentando muito o gasto com material nessas torres. Além disso, os fabricantes das encontram dificuldades em fazer chapas a partir de 50 milímetros (Way, 2014). A Tabela 9 mostra as dimensões encontradas.

Tabela 9 Dimensões das Torres calculadas

Dimensões da Torre de Aço			
Altura(m)	80	100	120
Diâmetro externo do topo (m)	3	3	3
Diâmetro externo da base(m)	4,5	4,5	4,5
Espessura de anel do topo (mm)	15	15	15
Espessura de anel da base (mm)	34	55	75
Dimensões da Torre de Concreto			
Altura(m)	80	100	120
Diâmetro externo do topo (m)	3	3	3
Diâmetro externo da base(m)	7,5	7,5	7,5
Espessura de anel do topo (mm)	200	250	250
Espessura de anel da base (mm)	275	325	350

Fonte: Way (2014) adaptado

Com as dimensões das torres encontradas, foram calculados os custos dos materiais de cada torre utilizando os custos unitários de cada componente na África do Sul (Tabela 10). Os custos das torres revelam que em termos de material as torres de aço têm um custo muito superior que as torres de concreto. Outro fato que se conclui com o estudo é que o custo da torre metálica aumenta em taxas muito maiores do que as torres de concreto, mostrando mais uma vez a inviabilidade das torres de aço para grandes alturas, se comparado com as de concreto. O custo da torre metálica cresce 80% e 107%, de 80 metros para 100 metros e 100 metros para 120 metros, respectivamente, enquanto o custo da torre de concreto cresce 68% e 56% para os mesmos aumentos de altura da torre. A Tabela 11 mostra os custos com cada material principal das torres, além da porcentagem de aumento.

Tabela 10 Custo unitário de acordo com preço de mercado na África do Sul

Custo de materiais		
Material/Constituinte	Unidade	Cost
Aço para concreto armado	R/ton	\$15,251.00
Aço para torre	R/ton	\$18,912.00
Concreto para torre	R/m3	\$ 2,007.00
Concreto para Fundação	R/m3	\$ 1,400.00
Protensão - Anchors Bolts + Acopladores	R/tower	\$33,440.00
Protensão - Cordoalhas e suportes	R/MN/m	\$ 120.00

Fonte: Way (2014) adaptado

Tabela 11 Custos de material das torres

Custo das Torres							
Altura (m)	Torre	Aço para Torre (ton)	Concreto para Torre (m3)	Protensão (MN)	Custo da Protensão (Rands)	Custo da Torre (Rands)	Porcentagem de aumento de custo
80	Aço	183,6	-	-	-	\$ 3,471,608.00	-
	Concreto	-	306	33,41	\$ 354,157.00	\$ 968,705.00	-
100	Aço	330,6	-	-	-	\$ 6,252,465.00	80%
	Concreto	-	457	56,79	\$ 714,963.00	\$ 1,632,051.00	68%
120	Aço	685,7	-	-	-	\$12,968,527.00	107%
	Concreto	-	608	90,20	\$ 1,332,343.00	\$ 2,552,493.00	56%

Fonte: Way (2014) adaptado

O estudo também engloba o custo das fundações das duas torres. O resultado mostra que as fundações das torres de concreto são menores e menos custosas que as de torre de aço. Devido as torres metálicas serem bem mais leves que as de concreto, as fundações das torres de aço precisam ser mais robustas para se obter peso extra para combater o risco ao tombamento da fundação (Way, 2014). A fundação fica mais custosa devido ao ganho de volume de concreto e ganho de peso do aço que compõe o elemento, como mostra a Tabela 12.

Tabela 12 Custo de material com fundação

Fundação Custo de material				
Altura (m)	Torre	Volume de concreto na fundação (m3)	Peso de aço na fundação	Custo(Rands)
80	Aço	606	53106	\$ 1,658,717.00
	Concreto	459	38266	\$ 1,226,405.00
100	Aço	707	62846	\$ 1,948,728.00
	Concreto	622	47040	\$ 1,588,619.00
120	Aço	921	82464	\$ 2,547,662.00
	Concreto	774	72813	\$ 2,194,576.00

Fonte: Way (2014) adaptado

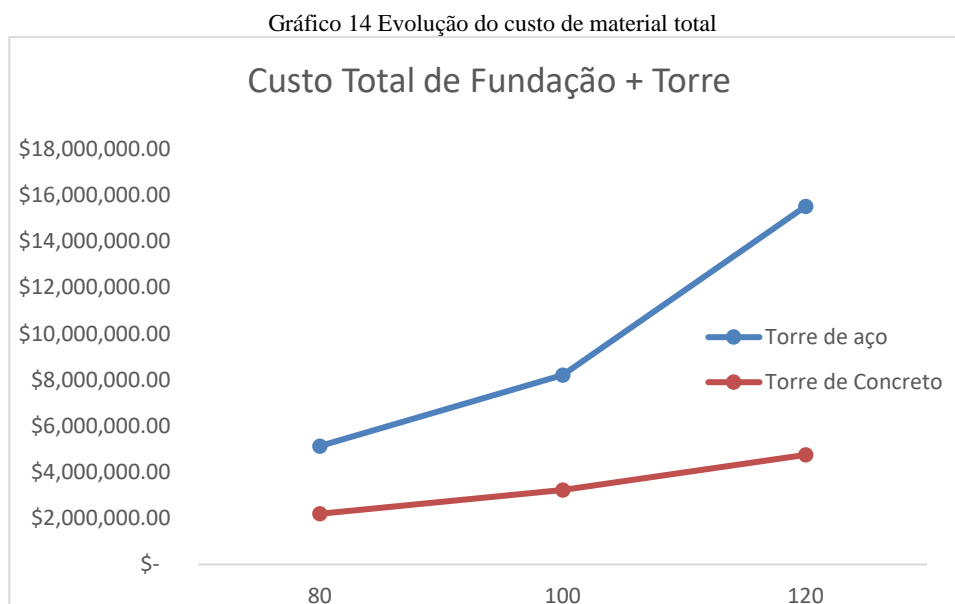
Portanto, o custo do material utilizado na produção da torre de aço é maior que na de concreto. O custo total da fundação mais a torre também é superior na solução de torre de aço, como mostra a Tabela 13.

Tabela 13 Custo de material total, Fundação + Torre

Custo Total Fundação + Torres				
	Altura (m)	Custo com Fundação (Rands)	Custo com Torre (Rands)	Custo Total (Rands)
Aço	80	\$ 1,658,717.00	\$ 3,471,608.00	\$ 5,130,326.00
	100	\$ 1,948,728.00	\$ 6,252,465.00	\$ 8,201,193.00
	120	\$ 2,547,662.00	\$ 12,968,527.00	\$15,516,189.00
Concreto	80	\$ 1,226,405.00	\$ 968,705.00	\$ 2,195,111.00
	100	\$ 1,588,619.00	\$ 1,632,051.00	\$ 3,220,670.00
	120	\$ 2,194,576.00	\$ 2,552,493.00	\$ 4,747,069.00

Fonte: Way (2014) adaptado

O Gráfico 15 mostra como o custo das torres evoluem com o aumento da altura das torres, mostrando que, como já foi dito, as torres de aço possuem uma taxa de acréscimo de custos com material maior do que as torres de concreto com aumento da altura.



Fonte: Way (2014) adaptado

A segunda abordagem tratada neste tópico utiliza-se de um quantitativo básico dos principais componentes que compõem uma torre de concreto, e compara com uma cotação real de uma torre metálica. Foi comparada as torres nas alturas de 80 e 100 metros.

A Tabela 14 mostra a cotação realizada para as torres metálicas. Foram obtidas as cotações de R\$ 1.745.192,17 para uma torre de 80 metros e R\$2.236.235,90 para uma torre de 100 metros.

Tabela 14 Cotação real de torres metálicas

Altura da torre (m)	Custo total de Aquisição da Torre (R\$)
80	R\$ 1,745,192.17
100	R\$ 2,236,235.90

Fonte: Autor (Cotação de mercado)

A torre de concreto utilizada para o quantitativo dos principais componentes foi fornecida pela empresa Windcraft Engenharia. Os custos unitários dos componentes principais

foram com base no preço de mercado. A torre utilizada como base foi a torre de 100 metros, de 24 segmentos. O volume de concreto dessa torre é de 431 metros cúbicos. O peso de aço para combater os esforços de tração foi utilizado a título de estimativa 2000 quilos por segmento, totalizando 48000 quilos por segmento. As cordoalhas de protensão tem boa participação no custo da torre de concreto protendido. Uma cordoalha é formada por 6 cabos entrelaçados. Durante a montagem da torre, ocorre a protensão em 6 pontos, mais a do topo do aerogerador. Para cada ponto ancorado, 4 cordoalhas são utilizadas, com exceção da última protensão no topo do aerogerador, que se utiliza de 16 cordoalhas. No total, são utilizados aproximadamente 19200 metros de cabos para protensão. Para a pintura externa, é utilizada uma resina epóxi de alta qualidade. A área externa de pintura da torre totaliza 2488 metros quadrados. Utilizando-se um consumo de 0.3 quilos por m², encontra-se 746.4 quilos de resina epóxi. Para recebimento da Nascelle no topo do aerogerador, é utilizado um segmento de aço de 6 metros. Outro componente das torres são as roscas de içamento. Foram utilizadas a quantidade média de 5 roscas por segmento de torre, totalizando 120 roscas. E finalmente, as bainhas galvanizadas, que protegem as cordoalhas do atrito com a peça de concreto. É utilizado uma bainha para cada cordoalha que é protendida. Portanto, são utilizadas um total de 816 bainhas de aço. O quantitativo da torre de 80 metros foi calculado com base no quantitativo da torre de 100 metros, fazendo a diminuição proporcional dos componentes, a título de estimativa.

Portanto, utilizando o quantitativo descrito, com os custos unitários de cada um deles, utilizando preços de mercado, foram encontrados os custos de cada torre, levando em consideração os principais componentes das torres de concreto. Para a torre de concreto de 80 metros, o custo de material encontrado foi de R\$ 618.706,08, enquanto para a torres de concreto de 100 metros foram encontrados R\$ 753.749.60. O custo total está exposto na Tabela 15.

Tabela 15 Estimativa de custo de material de torres de concreto de 80 e 100 metros.

Materiais e Componentes	Unidades	Custo Unitário (R\$)	Altura			
			80		100	
			Quantitativo	Custo total (R\$)	Quantitativo	Custo total (R\$)
Concreto	m3	R\$ 380.00	344.8	R\$ 131,024.00	431	R\$ 163,780.00
Aço	kg	R\$ 3.85	38400	R\$ 147,840.00	48000	R\$ 184,800.00
Cabos de Protensão	m	R\$ 10.80	15360	R\$ 165,888.00	19200	R\$ 207,360.00
Resina Epoxi para pintura externa	kg	R\$ 34.00	597.12	R\$ 20,302.08	746.4	R\$ 25,377.60
Segmento de aço cilíndrico topo da torre	und	R\$ 82,000.00	1	R\$ 82,000.00	1	R\$ 82,000.00
Rosca para içamento	und	R\$ 162.00	90	R\$ 14,580.00	120	R\$ 19,440.00
Bainha de aço galvanizado	und	R\$ 87.00	656	R\$ 57,072.00	816	R\$ 70,992.00
TOTAL				R\$ 618,706.08		R\$ 753,749.60

Fonte: Windcraft 2011 adaptado

As torres metálicas, nesta comparação apresentaram preço bem superior por ser uma cotação de mercado, que considera portanto os custos de produção da torre. Entretanto, podemos considerar que os custos de material representam metade do custo total da torre, considerando produção e o material da torre, a título de comparação. A Tabela 16 mostra a comparação entre os dois custos de torres.

Tabela 16 Comparação de custos entre torres de concreto e aço

Torre	Altura	Custo Total
Concreto	80	R\$ 1,237,412.16
	100	R\$ 1,507,499.20
Aço	80	R\$ 1,745,192.17
	100	R\$ 2,236,235.90

Fonte: Autor

4.5.2. Custos de transporte

O transporte é uma das partes mais importantes da logística e da estrutura de custos de um projeto eólico. Os custos envolvendo a logística e o transporte dos componentes dos aerogeradores torna extremamente desejável ao empreendedor ter acesso a fábricas dos

principais componentes o mais próximo possível do local de implantação do parque, devido ao elevado custo inerente ao transporte de cargas pesadas e com grandes dimensões. Essas duas características, adicionada a sensibilidade dos componentes, incluindo as torres, geram um desafio logístico no transporte deles para projetos eólicos.

O custo do transporte de torres varia bastante de projeto para projeto. Um dos fatores a ser analisado para a escolha da solução estrutural para o suporte de aerogerador é a distância que ele se encontra do local de fabricação do elemento. Dentre as dificuldades encontradas nos projetos de logística de transporte, está a escolha do traçado. Além dos custos normais de transporte, geralmente as empresas transportadoras fazem uma sondagem do percurso a ser percorrido, afim de encontrar a rota com menor interferência. Existem casos em que pequenas intervenções no traçado são necessárias, como alterações nas vias, sendo realizadas mediante acompanhamento das autoridades competentes ao local. Entretanto, existem situações em que maiores ações são necessárias, como desapropriações, que oneram bastante o projeto logístico. Outro custo inerente à logística de transporte de grandes componentes é o acompanhamento de batedores durante o percurso de grandes componentes como as torres, que é dimensionado de acordo com o comprimento da carga e seu peso.

O custo da logística de transporte pode ser decisivo no sucesso de um projeto. A participação do transporte da torre em relação ao custo total de transporte de todos os principais componentes é alta.

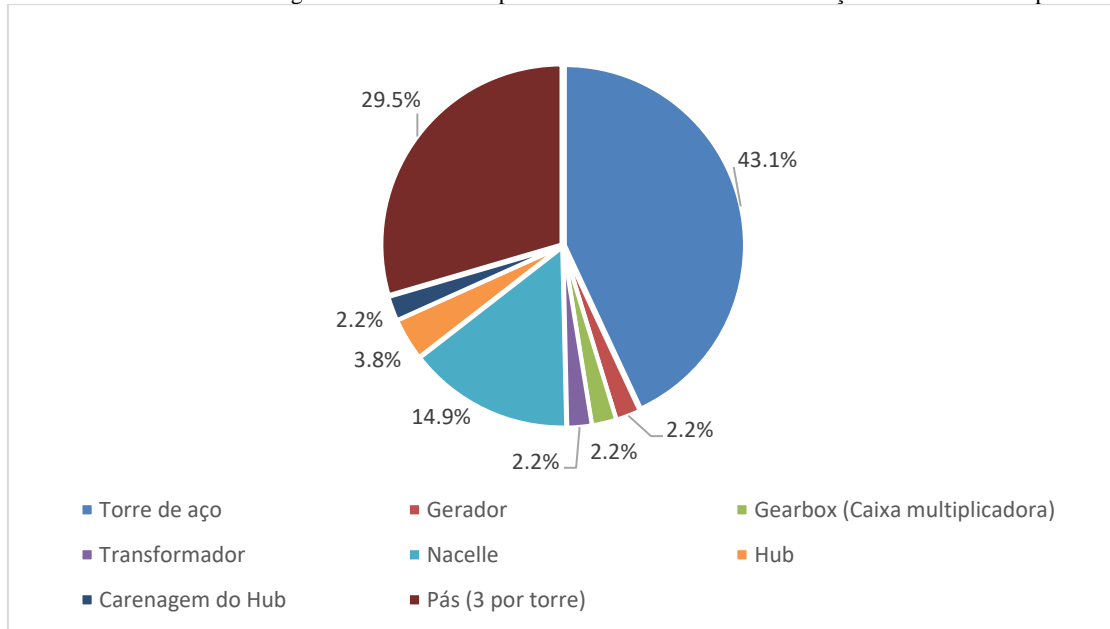
Considerando uma outra cotação real de custo de transporte de uma torre metálica e de outros principais componentes de um aerogerador de uma outra empresa, realizada em 2010, foi encontrada uma porcentagem do custo de transporte da torre em relação ao custo total de transporte de todos os componentes. A distância percorrida no trajeto é de aproximadamente 200km, bem próxima da distância entre a localização do terreno em estudo e fábrica de torre considerada, de Aquiraz, Ceará, podendo facilmente ser feita essa consideração para analisar a problemática desse trabalho. O resultado obtido foi que, para uma torre de 80 metros, o transporte da torre representa aproximadamente 43% do custo total de transporte de uma turbina. Já para uma torre de aço de 100 metros, a conclusão foi que 51% do custo de transporte total de todos os componentes é representado pelo transporte somente da torre, como pode ser visto na Tabela 17 e nos Gráficos 16 e 17.

Tabela 17 Porcentagem do custo de transporte da torre para o custo de transporte total

Principais componentes do aerogerador	Peso (ton)	Altura da torre (m)	Custo de transporte do componente (R\$)	Custo total de transporte do aerogerador (R\$)	Porcentagem do custo de transporte dos componentes torre de 85 m(%)	Porcentagem do custo de transporte dos componentes torre de 100 m(%)
Torre de aço	232	80	R\$56,780.00	R\$ 131,840.00	43.1%	-
	293,1	100	R\$76,760.00	R\$ 151,820.00	-	50.6%
Gerador	10,5	-	R\$ 2,890.00	-	2.2%	1.9%
Gearbox (Caixa multiplicadora)	22,5	-	R\$ 2,890.00	-	2.2%	1.9%
Transformador	6,0	-	R\$ 2,890.00	-	2.2%	1.9%
Nacelle	73,0	-	R\$19,580.00	-	14.9%	12.9%
Hub	31,0	-	R\$ 4,980.00	-	3.8%	3.3%
Carenagem do Hub	0,5	-	R\$ 2,890.00	-	2.2%	1.9%
Pás (3 por torre)	10,5	-	R\$38,940.00	-	29.5%	25.6%

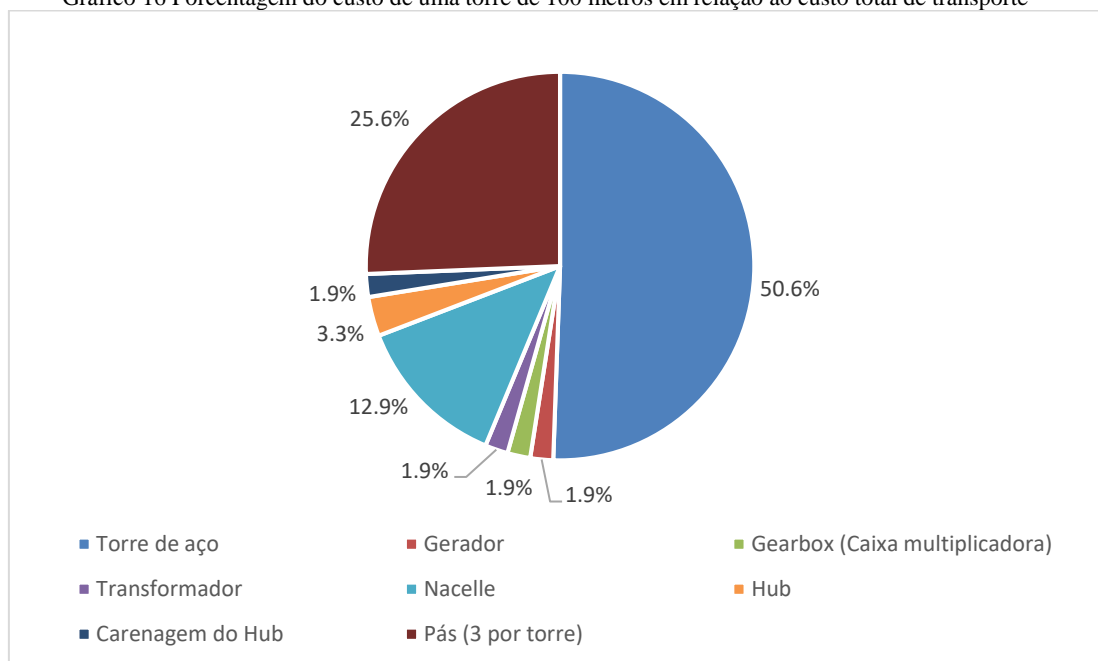
Fonte: Autor (Cotação de mercado)

Gráfico 15 Porcentagem de custo de transporte da torre de 80 metros em relação ao custo de transporte total



Fonte: Autor

Gráfico 16 Porcentagem do custo de uma torre de 100 metros em relação ao custo total de transporte



Fonte: Autor

As torres de aço tubular e as torres de concreto se utilizam de carretas similares para transporte de seus segmentos. O custo por viagem é parecido em relação às soluções de suporte, considerando a mesma distância a ser percorrida, com pequenas variações relativos às interferências do percurso. A única diferença é na quantidade de carretas necessária para levar as torres.

Por sua vez, em se tratando de um parque no município de Serra do Mel, a situação muda. No município de Areia Branca, Rio Grande do Norte, acerca de 20 km de distância, existe uma fábrica de torres de concreto pré-moldado. Fundada pela empresa Inneo, hoje se encontra sobre posse da Acciona, a fábrica foi criada para atender os parques da região, totalizando 303 MW de potência instalada fornecendo torres de concreto. Já no caso das torres de aço, a fábrica mais perto se encontra no município de Aquiraz, Ceará, à 240 Km de Serra do Mel.

A outra diferença é no número de carretas utilizadas. Enquanto as torres de aço precisam de 6 carretas extensivas para transportar uma torre com 100 metros de altura, as torres de concreto possuem de 22 segmentos a serem transportados. A torre de concreto utilizada como referência para o número de segmentos foi a fabricada para sustentar o modelo de aerogerador AW3000, 3.0 MW de potência, a máquina mais avançada fabricada pela Acciona.

Para o comparativo entre o transporte dos dois casos, foi utilizado como base a mesma cotação real de transporte de uma torre de aço utilizada anteriormente, transportada por uma

distância de 195 km. A título de comparação, foi considerado que os únicos custos variáveis são os de combustível. Foi considerado o custo do diesel sendo R\$ 3,10 por litro. Considerando um consumo de 0,3 litros por quilômetro, chegou-se a um custo de combustível por quilômetro de 0.93 R\$/km. O preço médio da cotação feita por carreta para uma torre de 100 metros é de R\$12.800,00. O custo fixo da carreta retirando-se o custo com combustível é de R\$12.600,00. Para se encontrar os custos do transporte das torres de aço, foi considerado esse preço fixo adicionado o custo variável do combustível para a distância da fábrica de Aquiraz no Ceará para a obra, utilizando as 6 carretas apresentadas na cotação. Para o cálculo dos custos de transporte das torres de concreto, foram consideradas duas carretas para transportar os 22 segmentos das torres, em viagens consecutivas de ida e volta, totalizando 44 viagens, de 17 km.

O resultado do custo de transporte para a torre de aço e para a torre de concreto está apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 Custos de transportes das torres de concreto e de aço para Serra do Mel

Torre	Altura(m)	Distância (km)	Custo fixo (R\$/carreta)	Custo variável (R\$/km)	Nº de carretas	Nº de viagens/carreta	Custo total (R\$)
Aço	100	240	R\$12,611.00	R\$ 0.93	6	1	R\$77,005.20
Concreto	100	17	R\$12,611.00	R\$ 0.93	2	22	R\$25,917.64

Fonte: Autor

4.5.3. Custo de montagem

A montagem das torres eólicas é outro processo que onera bastante o custo final do empreendimento. Esta etapa do projeto exige um planejamento muito bem feito para que os equipamentos de içamento não fiquem ociosos. A montagem das torres eólicas exige equipamentos que são capazes de levantar cargas extremamente pesadas, de aproximadamente 100 toneladas, à altura que varia de 80 a 120 metros dependendo da torre em questão. Os guindastes utilizados para montagem das torres são equipamentos com capacidade de carga muito alta, e por isso tanto o custo de mobilização, que inclui o transporte do equipamento até o local da obra, quanto a diária do equipamento são extremamente onerosas.

As torres de aço e de concreto pré-moldada são semelhantes em termos de montagem. As torres de concreto pré-moldado possuem inúmeras variações que influenciam na etapa de montagem do projeto, podendo ocorrer ou não pré-montagem dos anéis na plataforma. Além de precisarem de pré-montagem, as torres de concreto são mais robustas e pesadas que a de aço. Por isso, as torres de aço possuem maior facilidade e flexibilidade para serem montadas. Em consequência disto, o tempo de montagem destas torres é menor que os das torres de concreto. Os guindastes utilizados para montagem são os mesmos para as torres metálicas e de concreto,

que é o modelo LR1800 ou LR/LG1750. Os guindastes LR 1600 tem capacidade para montar as torres metálicas em alguns casos, porém o mais utilizado é o LR1800 ou LR/LG1750.

Como foi dito, as torres metálicas têm uma produtividade maior em termos de montagem que as de concreto. Isso reflete totalmente no custo total de montagem das torres. Enquanto as torres de concreto têm um tempo de montagem de 7 dias, o tempo de montagem das torres metálicas é de 2 dias. Considerando apenas os custos com guindastes, foi calculado os custos de montagem de cada tipo de torre a título de comparação. Considerando uma cotação real feita para a montagem de 50 torres metálicas em um parque, com dois guindastes, foi encontrado o valor de R\$178.120,05 para o custo com guindastes por montagem feita de uma torre metálica, enquanto a montagem da torre de concreto custa R\$513.620,17. Ou seja, a cada montagem de torre de concreto, montariam-se 3 torres metálicas. A diferença no tempo de montagem também reflete no custo com mão de obra, que eleva ainda mais essa diferença. A Tabela 19 exhibe o comparativo de custos, mostrando que a parte do custo que mais onera é a mobilização do equipamento.

Tabela 19 Custo de montagem das torres de concreto e aço

Torre	Guindaste	Número de guindastes	Número de Torres no parque	Tempo de montagem (dias)	Custo com mobilização e desmobilização do guindaste(R\$)	Custo da diária do guindaste (R\$)	Custo total do guindaste por torre(R\$)
Aço	LR 1800	2	50	2	R\$ 1,098,000.00	R\$ 33,550.01	R\$ 178,120.05
Concreto	LR 1800	2	50	7	R\$ 1,098,000.00	R\$ 33,550.01	R\$ 513,620.17

Fonte: Autor (Cotação real)

4.5.4. Resultado do Custo de aquisição

Portanto, somando os custos de material, de transportes e de montagem, temos o resultado exposto na Tabela 20.

Tabela 20 Custo total de aquisição de torres de concreto e metálicas de 100 metros

Torre	Altura (m)	Custo com material (R\$)	Custo de transporte (R\$)	Custo de montagem (R\$)	Custo Total de Aquisição (R\$)
Concreto	100	R\$ 1,507,499.20	R\$ 25,917.24	R\$ 513,620.17	R\$ 2,047,036.61
Aço	100	R\$ 2,236,235.90	R\$ 77,005.20	R\$ 178,120.05	R\$ 2,491,361.15

Fonte: Autor

A Tabela 21 mostra os aspectos discutidos sobre custo de aquisição, e destaca a torre que possui vantagem nos quesitos estabelecidos.

Tabela 21 Aspectos discutidos no critério Custos de Aquisição

#	Aspectos discutidos	Vantagem para	Observações	
			Torre de Aço	Torre de Concreto
1	Custo de material	Torres de Concreto	Aço brasileiro é 30% mais caro que o Europeu	Como visto, tanto no Brasil, como na África do Sul, o custo com material das torres de concreto é maior
2	Custo de transporte	Torres de Concreto	A distância entre as fábricas de torres de aço e os parque eólicos são grandes, elevando assim os custos de transporte.	Para o caso estudado, os custos de transporte das torres de concreto são menores que as metálicas, devido a fábrica ser instalada no local.
3	Custo de montagem	Torres de aço	A montagem das torres metálicas são feitas em menos tempo, e por isso são menos custosas	O prazo de montagem é maior, por isso torna-se mais custoso.

Fonte: Autor

4.6. CUSTOS DE MANUTENÇÃO

O custo de operação e manutenção de um projeto eólico geralmente é dividido em duas partes: Custos fixos e custos variáveis. Os custos fixos englobam gastos conhecidos e certos, como manutenções programadas, gastos administrativos e das salas de controle do parque, custo com seguro entre outros. Os custos variáveis englobam manutenções corretivas não programadas e outros custos que podem aparecer durante a vida útil do parque (Moné et al., 2013). A operação e manutenção tem como objetivo principal manter níveis altos de disponibilidade e fator de capacidade. A disponibilidade de um aerogerador é a porcentagem do tempo em que o aerogerador estava disponível para gerar energia na usina. Este fator é estreitamente relacionado com uma boa manutenção periódica da máquina. Já o fator de capacidade é a relação entre a energia gerada e o total que o parque pode gerar se estivesse gerando à potência nominal durante todo tempo, em porcentagem. Os fatores que influenciam diretamente neste último indicador é a qualidade e a constância dos ventos da região durante o ano e a qualidade, além da eficiência do aerogerador.

Um aspecto que tem prevalecido nos novos projetos é a consideração dos custos de operação e manutenção durante a vida útil da usina. Está sendo cada vez mais investigado os efeitos de diferentes opções e períodos de planos de operação e manutenção na disponibilidade e no fator de capacidade das usinas eólicas, o que permite que os novos projetos desenvolvidos preverem com mais precisão esses indicadores. Isso tem como consequência a redução dos riscos dos empreendedores (Way, 2014). Entretanto, os dados de custeio de operação e manutenção são protegidos pelos fabricantes, e por isso encontra-se certa dificuldade de encontrar o custo durante essa fase do projeto (Moné et al., 2013). Por isso, os custos de manutenção não serão estimados nesse trabalho.

Os custos de manutenção da torre de concreto são mínimos quando comparado aos custos de manutenção numa torre metálica. As torres metálicas possuem problemas com corrosão por estar situadas em região extremamente agressiva, geralmente em região costeira do Nordeste. As torres de concreto, quando é adicionado um bom revestimento, além de pintura externa adequada, conseguem durar cerca de 50 anos, podendo portanto atender a duas gerações de aerogeradores, fazendo com que o custo seja amortizado em bem mais tempo (Engstrom et al., 2010).

Em uma inspeção a uma usina no Piauí em uma região com condições parecidas que Serra do Mel, foram encontrados sinais de corrosão nas torres metálicas. Os parques estão operando a 8 anos, o que prova que é necessário serem feitos tratamentos de corrosão periódicos nessa frequência ou em frequência menor. A Figura 7 mostra a corrosão nas torres, e a Figura 8 mostra o tratamento corretivo que estavam realizando nas torres do parque. É utilizado uma resina à base de epóxi de qualidade altíssima para o tratamento, sendo custoso o serviço.

Figura 7 Torre metálica oxidada



Fonte: Autor

Figura 8 Corrosão tratada com resina epoxi



Fonte: Autor

Outra inspeção foi realizada em outra usina localizada em Beberibe, no litoral do Ceará. As torres utilizadas foram torres de concreto. Nelas não foram encontrados sinais de danos. Os danos encontrados foram nos segmentos metálicos utilizados para recebimento da Nascelle, como mostra Figura 9. Além da corrosão da torre, as torres metálicas sofrem com a

necessidade de verificação do torque dos parafusos estruturais, que compõem a conexão de um tramo ao outro.

Figura 9 Torre de concreto em boas condições. Corrosão no segmento metálico



Fonte: Autor

A Tabela 22 mostra os aspectos aqui discutidos assim como qual torre apresenta vantagem neste quesito.

Tabela 22 Aspectos discutido sobre o critério Custo de Manutenção

#	Aspectos discutidos		Vantagem para/Observações	
			Torre de Aço	Torre de Concreto
1	Corrosão	Torres de Concreto	As torres metálicas são sujeitas a corrosão durante sua vida útil.	As torres de concreto não sofrem com agressividade do meio.
2	Verificação de torque	Torres de Concreto	As torres metálicas precisam de checagem periódicas em suas conexões	As conexões das torres de concreto são feitas com graute de alto rendimento.

Fonte: Autor

4.7. CUSTOS DE DESMOBILIZAÇÃO

O custo de desmobilização significa o custo com a desconstrução ou demolição das torres eólicas ao fim de sua vida útil. Essa desmobilização pode ser necessária em dois momentos: ao final da vida útil da torre, quando ela não consegue desempenhar suas funções estruturais de forma segura ou quando o objetivo é aumentar a capacidade de geração, trocando o aerogerador instalado por outro com potência nominal maior ou com maior eficiência, o que podemos chamar de repowering.

O repowering de parque eólicos é uma tendência para a maioria dos parques que estão instalados no mundo inteiro. Grandes partes dos países geradores de energia através dos ventos instalaram seus primeiros parques acerca de 15 anos atrás, e por isso não estão passando por processos de repowering no momento, como é o caso do Brasil. Entretanto, os países pioneiros na implantação de parques eólicos possuem alguns parques que já passaram ou estão em processo de repowering, como Alemanha, Estados Unidos e Dinamarca. Na Dinamarca, o primeiro programa de repowering aconteceu entre os anos de 2001 e 2003. Neste programa, 1480 turbinas totalizando uma potência instalada de 122 MW foram trocadas por 272 novas turbinas com 332 MW de capacidade instalada somadas (DWIA, 2013). Portanto, a capacidade de geração de energia foi quase triplicada, com uma diminuição enorme de aerogeradores instalados. Em 2011, a Dinamarca representava 51 % de toda capacidade instalada por repowering no mundo. Tanto a Dinamarca quanto a Alemanha possuem atualmente incentivos para realizar o repowering nos parques.

Como podemos ver, a capacidade de geração de energia eólica de um país é limitada pela atual tecnologia que está implantada. Os constantes avanços tecnológicos que a indústria de aerogeradores tem realizado permite afirmar que a capacidade de geração do Brasil ou do Rio Grande do Norte pode duplicar ou triplicar com o passar dos anos.

A escolha da alternativa influencia o custo para fazer uma desmobilização. No caso das torres metálicas, é muito mais simples fazer a desmobilização da torre, por se tratar apenas de uma desmontagem. O custo de desmontagem da torre fica similar ao custo de montagem. No caso destas torres metálicas, o metal pode ser comercializado como reciclado e gerar certa renda com o repasse. O metal reciclado possui inúmeras aplicações. No caso das torres de concreto, para a desmobilização é necessário a utilização de detonação, quando se utiliza de explosivos para desmobilizar a torre, ou através de simples demolição com auxílio de máquinas.

Existem aplicações para resíduos de concreto, como base de rodovias, porém a valores muito baixos.

Vale Salientar também que, por essa dificuldade de reutilização de resíduos de concreto, resulta-se portanto em um problema de questão ambiental. O montante de resíduos geradas em uma desmobilização de um parque nem sempre se contra destino de reutilização, sendo assim um impacto negativo ao local onde ele será despejado. As torres de aço não sofrem com este problema por ter uma reciclagem com maiores aplicações no mercado.

Vendo por uma outra perspectiva, as torres de concreto têm uma vantagem no critério custo de desmobilização pois tem a possibilidade de receber duas gerações de aerogeradores, amortizando em dois projetos o custo com a desmobilização. Dependendo do cobrimento utilizado na torre, a vida útil da torre pode chegar a 50 anos (Engstrom et al., 2010). Dependendo do projeto de torre, ela pode ser reutilizada em um processo de repowering.

Por não haver registros de parque eólico passando por processo de repowering, não foi realizado uma estimativa de custos de desmobilização neste trabalho. A Tabela 23 os aspectos discutidos neste critério, assim como qual torre possui vantagem em cada aspecto.

Tabela 23 Aspectos discutidos no critério custos de desmobilização

#	Aspectos discutidos	Vantagem para/Observações		
		Torre de Aço	Torre de Concreto	
1	Execução	Torres de Aço	As torres de aço possuem uma desmobilização mais simples, além de se ter mais aplicações de reciclagem e reuso do material	As torres de concreto são custosas em termos de desmobilização.
2	Repowering	Torres de Concreto	As torres de aço possuem uma vida útil de 20 anos, e por isso não tem a possibilidade de ser aproveitada em um repowering	As torres de concreto tem a possibilidade de ser reutilizada com outra turbina

Fonte: Autor

4.8. ANÁLISE DE RESULTADOS

A avaliação comparativa foi realizada com base em uma análise de critérios estabelecidos dando importância aos aspectos estratégicos, logísticos e econômico. Com isso pode se chegar a um entendimento dos principais pontos a serem considerados na avaliação de uma alternativa de torre para um projeto eólico.

Nos critérios estratégicos foi visto que as torres de concreto, para a realidade do município de Serra do Mel, têm ampla vantagem sobre as torres de aço.

Primeiramente, no aspecto logístico, temos que as torres metálicas têm limitação de diâmetro de base de por volta de 4,5 metros devido as limitações de transporte. Isso faz com que ela não consiga atingir grandes alturas, fato que vai contra as tendências atuais de aumento de altura das torres para aumento de geração. O fato da mobilidade da fábrica de torres de concreto ser viável cria uma alternativa positiva para diminuição de custos com transporte. No Brasil, a maioria dos parques que se utilizam de torres de concreto tiveram ou têm

No quesito desempenho estrutural, podemos concluir que as torres de concreto têm vantagem sobre as torres metálicas, devido à alta rigidez ocasionada pela possibilidade de se atingir grande diâmetros de base, atrelados robustez ou grande espessura das paredes das torres, que somada às propriedades de amortecimento estrutural do concreto, findam apresentando um bom desempenho em termos da diminuição de nível de ruído, diminuição de desgaste por vibrações excessivas, e na fuga dos efeitos de ressonância, apresentando portanto uma vida útil superior ao das torres metálicas.

Em relação ao fornecimento de matéria prima, temos que existem dificuldades estratégicas e de custos em termos de fornecimento de matéria prima para a alternativas de torres metálicas, devido a não produção em larga escala das chapas de aço de liga especial. Em contra ponto, o fornecimento de matéria prima para as torres de concreto é facilitado. A utilização de jazidas locais para as fábricas tem como consequência o desenvolvimento da região onde está inserida a usina, sendo importante se analisado o contexto de benefícios socioeconômicos para a região. O mercado de pré-fabricados de concreto ainda não consegue abastecer integralmente a demanda de torres, e por isso as torres metálicas são grande maioria no território brasileiro.

Passando para aspectos econômicos, o custo de aquisição foi dividido em custos de materiais, custos de transportes e custos de montagem. Comparando as duas alternativas quanto ao custo de material, podemos chegar à conclusão que as torres metálicas possuem um custo bem maior que as torres de concreto. Tanto o custo encontrado com custos de matéria prima na África do Sul, quando o cálculo estimado do custo da torre de concreto com custos de materiais aqui do Brasil, teve como resultado que as torres metálicas são mais caras em termos de material.

Os custos de transporte das torres de concreto são menores que os da torre metálica. Isso acontece devido ao fato da fábrica das peças terem viabilidade de serem instaladas dentro da obra, diminuindo muito os custos com transporte.

Em termos do custo de montagem, as torres metálicas apresentam um menor custo por serem montadas em menos tempo. As torres metálicas possuem vantagens em termos de facilidade e rapidez na execução, conseqüentemente o custo é mais baixo que as torres de concreto.

Então, no critério custos de aquisição, somando os três resultados das estimativas de custos, podemos definir que a torre de concreto é menos custosa do que a torre metálica.

Passando para os custos de manutenção, podemos concluir que os custos durante a vida útil das torres metálicas são consideravelmente maiores que os de torres de concreto. A manutenção das torres metálicas engloba tratamentos periódicos de corrosão e verificação das conexões, manutenções essas que não são necessárias em torres de concreto com a mesma periodicidade. As torres de concreto praticamente não apresentam custos com manutenção durante sua vida útil.

Finalmente, no quesito custo de desmobilização, podemos perceber que as torres metálicas têm vantagem em relação as torres de concreto por ser fácil o processo de desmontagem, além de se conseguir com mais facilidade o destino os resíduos da desmobilização, sendo o metal capaz de ser reutilizado mais facilmente e em mais aplicações, o que traz benefícios econômicos e ambientais. O repowering de parques podem utilizar as torres de concreto para receber uma nova turbina, o que amortiza em dois projetos os custo de desmobilização, sendo portanto uma vantagem. Por não existir registros de repowering de parque eólicos no Brasil, não foi realizada uma estimativa de custos de desmobilização neste trabalho.

Portanto, o resultado final obtido é de que para um parque na região de Serra do Mel, Rio Grande do Norte, a alternativa com maiores ganhos em termos estratégicos, logísticos e econômicos foi a torre de concreto pré-moldado protendido. O fato da fábrica ser instalada próxima ao parque é determinante no quesito econômico, pois os custos com transportes são minimizados. Apesar de um maior custo de montagem e maior prazo de implantação, os aspectos estratégicos logísticos, assim como o baixo custo de material, superam essas adversidades. A Tabela 24 mostra um resumo de todos os aspectos discutidos neste trabalho, assim como a avaliação da alternativa mais vantajosa para cada aspecto considerado.

Tabela 24 Tabela geral de resultado de Avaliação comparativa entre torres de aço e de concreto

	Critérios	Aspectos discutidos	Vantagem para	
			Torre de aço	Torre de concreto
E S T R A T É G I C O S	Aspectos logísticos	Mobilidade de fábrica		X
		Limitação de altura		X
	Desempenho estrutural	Desgaste por fadiga		X
		Ressonância		X
		Deflexão		X
		Vida Útil		X
		Vibrações e Ruídos		X
	Fornecimento de matéria prima	Mercado Estabelecido		X
		Acesso à matéria prima		X
		FINAME		X
		Fornecimento local		X
		Domínio de mercado	X	
E C O N Ô M I C O S	Custo de Aquisição	Custo de material		X
		Custo de transporte		X
		Custo de montagem	X	
		Prazo	X	
	Custo de Manutenção	Custos		X
		Corrosão		X
		Verificação de torque		X
	Custo de desmobilização	Custos	X	
		Repowering		X

Fonte: Autor

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A exploração da energia eólica para fins comerciais é relativamente recente, com o primeiro aerogerador instalado em 1980, na Dinamarca. No Brasil, o desenvolvimento expressivo do mercado eólico ainda é mais recente, com os primeiros incentivos dados em 2005 através do PROINFA. Devido a isso, a disponibilidade de dados sobre o assunto para fins de pesquisa, mais especificamente na parte de custos de projetos e componentes, é bem restrita. A disponibilidade de dados de pesquisa traz o interesse de pesquisadores ou profissionais da área a pesquisar e se aprofundar no assunto, trazendo assim benefícios para o setor. Devido a esse fato, a abordagem realizada para avaliação comparativa foi muito mais qualitativa, sendo utilizada estimativas de custos a título de comparação.

A abordagem acerca das torres eólicas está em alta no mercado eólico brasileiro, devido a dinâmica do mercado. O fato dos ativos do investimento na geração eólica serem de propriedade do empreendedor faz com que haja um estímulo contínuo em busca de melhorias de eficiência e competitividade. Uma das formas de se atingir maior geração, e por isso maior eficiência no investimento é buscando torres cada vez mais altas, que consigam atingir ventos mais fortes para suprir a necessidade de uma turbina de potência nominal maior. A busca por torres mais alta também acontece ao se ocupar terrenos com vento mais fracos, e que haja necessidade de buscar bons ventos a altura maiores, sendo auxiliado também por um aumento de rotor.

As torres metálicas e de concreto dominam o mercado brasileiro, por isso foram escolhidas para serem analisadas. As torres de concreto apresentaram maiores vantagens levando em condições os aspectos logísticos, estratégicos e econômicos estudados. Em termos gerais, as torres de concreto possuem maior tendência ao desenvolvimento por possibilitar o atingimento de grandes alturas, fato esse que pode ser vital no desenvolvimento do mercado desta alternativa. Hoje não existe oferta suficiente de fábricas de concreto pré-moldado para atendimento integral da demanda, porém a tendência é que este mercado se desenvolva com o passar dos anos.

O fato das torres de concreto não possuírem grandes aplicações quando demolidas pode ser um fator determinante na escolha da solução para torre devido aos prejuízos econômicos e ambientais.

Dentre as recomendações de pesquisa sobre o tema, podemos destacar o cálculo estrutural e custeio detalhado de cada alternativa de torre eólica, para torres instaladas no Brasil., o custeio de um processo de repowering em um parque e um levantamento de custos de operação e manutenção de um ou alguns parques instalados no Brasil.

Portanto, podemos concluir que, diante de considerações de custos feitas, as torres de concreto são mais viáveis economicamente na aquisição da torre. Levando em consideração toda a vida útil das torres, não podemos ter certeza se a torre de concreto é menos custosa que a de aço, pois dados de operação e manutenção de um parque eólico é extremamente restrito, porém as informações levantadas neste trabalho disponibilizam uma ferramenta para uma melhor escolha de solução estrutural para torres, por parte de fabricantes e empreendedores. Os custos de desmobilização de um parque não foram calculados pois não há registro de desmobilização e repowering de parque eólicos no Brasil. Levando em consideração os aspectos estratégicos e logísticos, temos uma ampla vantagem da torre de concreto, principalmente devido a não limitação de altura, o que põe as torres de concreto como principal

alternativa de torres altas. Além disso, o fato de se existir um mercado de concreto bem estabelecido no país, cria benefícios para a fabricação dessas torres. Um último ponto a ser considerado é a viabilidade de mobilidade da fábrica para o local da obra, trazendo uma diminuição óbvia de custos de transporte, findando assim em mais uma vantagem para as torres de concreto.

REFERÊNCIAS

A WORLD-LEADER IN WIND ENERGY. Disponível em: <<http://denmark.dk/en/green-living/wind-energy/>>. Acesso em: 18 out. 2016.

ABOUT Wind Energy - The Facts. Disponível em: <<http://www.wind-energy-the-facts.org/>>. Acesso em: 25 out. 2016.

CORSINI, Rodnei. **Montagem de torres eólicas**. Ed. 51. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/51/montagem-de-torres-eolicas-364737-1.aspx>>. Acesso em: 31 out. 2016.

DA COSTA, Gabriel Bueno. **Concessões de usinas hidrelétricas**. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,concessoes-de-usinas-hidreletricas-imp-906238>>. Acesso em: 25 out. 2016.

DESTINO da concessão de 114 hidrelétricas e 41 distribuidoras de energia ainda é incerto. Disponível em: <<http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,ERT255825-18071,00.html>>. Acesso em: 25 out. 2016.

ENGSTROM, Staffan et al. **Tall towers for large wind turbines**: Etforsk. 2010. Disponível em: <http://www.windpower.org/download/1266/vindforsk_projectpdf>. Acesso em: 03 nov. 2016.

ENERGIA eólica tem potencial para 500 GW, segundo DEWI . Disponível em: <<http://www.setorenergetico.com.br/energia/energia-eolica-tem-potencial-para-500-gw-segundo-dewi/8275/>>. Acesso em: 30 out. 2016.

IRENA, Secreteriat. **Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series**: International Renewable Energy Agency. 2012. Disponível em: <https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-WIND_POWER.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2016.

LANTZ, Eric. **Wind Power Project Repowering: History, Economics, and Demand**. 2015. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63591.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2016.

LÚCIO, V.; CHASTRE, C. **TORRES EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO PARA GERADORES EÓLICOS**. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/6589930-Torres-em-concreto-pre-moldado-para-geradores-eolicos.html>>. Acesso em: 30 out. 2016.

MONÉ, C. et al. **2013 Cost of Wind Energy Review**: National Renewable Energy Laboratory. 2015. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63267.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2016.

NORDESTE é maior produtor de energia eólica no Brasil; Ceará aparece em 3º no País. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/noticias/1267-nordeste-%C3%A9-maior-produtor-de-energia-e-%C3%B3lica-no-brasil- Cear%C3%A1- aparece-em->>

3%C2%BA-no-pa%C3%ADs.html>. Acesso em: 26 out. 2016.

PAULINO, Rita de Cássia. **Rio Grande do Norte possui a maior matriz eólica do país.** Disponível em: <[http://Rio Grande do Norte possui a maior matriz eólica do país - See more at: http://jucern.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=54487&ACT=null&PAGE=null&PARM=null&LBL=NOT%C3%8DCIA#sthash.RCHzIIDR.dpuf](http://Rio%20Grande%20do%20Norte%20possui%20a%20maior%20matriz%20e%C3%B3lica%20do%20pa%C3%ADs)>. Acesso em: 26 out. 2016.

PESQUISA inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro de concreto. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/noticias/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto/>>. Acesso em: 03 nov. 2016.

RESEARCH & Studies. Disponível em: <http://www.dewi.de/dewi_res/index.php?id=26>. Acesso em: 30 out. 2016.

ROSA, Bruno. **Governo vai aumentar período de concessão de usinas hidrelétricas.** Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/economia/petroleo-e-energia/governo-vai-aumentar-periodo-de-concessao-de-usinas-hidreletricas-17209556>>. Acesso em: 02 nov. 2016.

SCHMITZ, Grant; SRITHARAN, Sri. **Iowa State engineers design, test taller, high-strength concrete towers for wind turbines.** 2013. Disponível em: <<http://www.news.iastate.edu/news/2013/05/14/concreteturbinetowers>>. Acesso em: 15 set. 2016.

SHUKMAN, David. **China dá maior impulso à energia eólica já visto no mundo.** Disponível em: <http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/01/140108_china_eolica_mdb>. Acesso em: 18 out. 2016.

STEEL vs Precast Concrete for Wind Turbines. Disponível em: <<http://fabcon-usa.com/2013/05/steel-vs-precast-concrete-wind-turbine-towers/>>. Acesso em: 26 out. 2016.

TEGEN, S. et al. **2010 Cost of Wind Energy Review: National Renewable Energy Laboratory.** 2012. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52920.pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2016.

TRANSPORTATION & Logistics. Disponível em: <<http://www.awea.org/Issues/Content.aspx?ItemNumber=5035>>. Acesso em: 28 out. 2016.

WAY, Andrew Christopher. **A Study on the Design and Material Costs of Tall Wind Turbine Towers in South Africa.** 2014. 1 a 169 p. Master degree (Master in Civil Engineering)- Faculty of Engineering, Stellenbosch University, South África, 2014. Disponível em: <<http://scholar.sun.ac.za>>. Acesso em: 07 nov. 2016.

WIND Power Leads All New Power Generation. Disponível em: <<http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>>. Acesso em: 19 out. 2016.

WISER, Ryan; BOLINGER, Mark. **2014 Wind Technologies Market Report**: U.S. Department of Energy. 2015. Disponível em:<<http://energy.gov/sites/prod/files/2015/08/f25/2014-Wind-Technologies-Market-Report-8.7.pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2016.