

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

MURILO AUGUSTO DE ARAÚJO BRITO

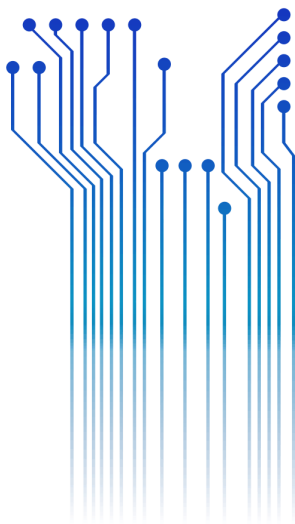


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
LAYOUT DE PARQUES EÓLICOS



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
Setembro de 2017

MURILO AUGUSTO DE ARAÚJO BRITO

LAYOUT DE PARQUES EÓLICOS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Energias Renováveis

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, D. Sc.

Campina Grande, 2017

MURILO AUGUSTO DE ARAÚJO BRITO

LAYOUT DE PARQUES EÓLICOS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Energias Renováveis

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Leimar de Oliveira, D. Sc.

Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

AGRADECIMENTOS

Como pessoa religiosa, agradeço a Deus, em primeiro lugar, pelo dom da vida e pelas bênçãos.

Agradeço aos meus pais, José Flávio de Brito e Maria Edinete de Araújo Brito, assim como minha irmã, Natália Araújo Brito, por estarem sempre ao meu lado e por terem me dado todas as condições possíveis para que eu pudesse realizar minhas atividades.

Agradeço a toda minha família, dos sítios Entre Serras e Riacho Fundo, por todo o carinho de sempre.

Agradeço imensamente aos meus amigos, em especial a Matheus Almeida, Álvaro Calazans, Kléber Júnior, Marconi Menezes, Júlio César Gomes, Suelson Lopes e Matheus Abrantes, por tudo.

Agradeço ao professor orientador, Leimar de Oliveira, por ter aceitado colaborar com a atividade e auxiliar na construção do relatório.

Agradeço aos professores Ubirajara Meira, Edgar Roosevelt pelos momentos de descontração e ajuda na formação pessoal e profissional.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

“1% de chance representa 99% de esperasnça”
Autor Desconhecido

RESUMO

No cenário atual, com o crescimento da demanda por energia e a constante preocupação com o meio ambiente, surgiu a necessidade de se desenvolver tecnologias de geração complementar, comumente chamados de energias renováveis. Neste ambiente, a geração de energia eólica aparece como uma boa opção, devido ao fato de possuir uma grande disponibilidade de fonte para a geração, que são as correntes de ar, e de ser vista com um baixo potencial poluidor. Apesar disso, torna-se necessário um estudo prévio para analisar a viabilidade de uma construção de grande porte, baseada nessa tecnologia. Assim como estudos constantes durante o funcionamento do mesmo para se ter uma ideia dos índices e metas que vão sendo atingidos ao longo do tempo de funcionamento, além da análise dos principais problemas, média de tempo inativo dos aerogeradores, dificuldades encontradas e tudo que diz respeito a geração de energia num empreendimento desse tipo. Este trabalho apresenta uma visão geral sobre o projeto de parques eólicos, adiantando que seus layouts são satisfatórios.

Palavras-chave: Energias Renováveis, Energia Eólica, Parque Eólico, Aerogerador.

ABSTRACT

In the current scenario, with the growing demand for energy and constant concern for the environment, the need arose to develop alternative generation technologies, commonly called renewable energies. In this environment, the generation of wind energy appears as a good option, due to the fact that it has a great availability of source for the generation, that is the air currents, and to be seen with a low polluting potential. Despite this, a previous study is necessary to analyze the viability of a large construction, based on this technology. As well as constant studies during the operation of the same to get an idea of the indexes and goals that are reached during the time of operation, in addition to the analysis of the main problems, average inactive time of the towers, difficulties encountered and everything that concerns the generation of energy in such an enterprise. This paper presents an overview of the wind farm project.

Keywords: Renewable Energy, Wind Energy, Wind Farm, Wind Turbine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Composição interna de um aerogerador.....	23
Figura 2 – Curvas de potência para turbinas	24
Figura 3 Estação de testes de aerogeradores.....	26
Figura 4 – Limite de distância para medições	27
Figura 5 – Representação do efeito esteira	33
Figura 6 – Disposição de aerogeradores em parque eólico	33
Figura 7 – Disposição de aerogeradores sem efeito esteira	35
Figura 8 – Disposição de aerogeradores com efeito esteira – Total e Parcial.....	35
Figura 9 – Instalação de torre anemométrica com sensores	38
Figura 10 – Etapas de um projeto de parque eólico.....	41
Figura 11 – Design parque eólico.....	41
Figura 12 – Design parque eólico – conexão à rede.....	42
Figura 13 – Etapas instalação parque eólico no Brasil	44
Figura 14 – Sítio escolhido para projeto de parque eólico.....	47
Figura 15- Região parque eólico em análise	48
Figura 16: Relevo de região – possível parque eólico	49
Figura 17 Direção dos ventos – região parque eólico.....	50
Figura 18 – Distância entre aerogeradores	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEC	International Electrotechnical Commission – Comissão Eletrotécnica Internacional
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
Datalogger	Sistema de Armazenamento de Dados
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EUA	Estados Unidos da América
SIN	Sistema Nacional Interligado
CGH	Central Geradora Hidroelétrica
M	Metro
S	Segundos
TWh	Terawatt-Hora
MW	Megawatt
Onshore	Parque eólico em terra
Offshore	Parque eólico em mar
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

SUMÁRIO

1	Introdução.....	12
1.1	Objetivos.....	13
1.2	Estrutura do Trabalho.....	15
2	Panorama da energia eólica.....	16
2.1	Energia eólica no mundo.....	16
2.2	Energia Eólica no Brasil.....	18
3	Fundamentação teórica.....	22
3.1	Aerogeradores.....	22
3.1.1	Área de testes para aerogeradores.....	24
3.1.2	Medição de potência de aerogeradores.....	26
3.1.3	Potência de turbina eólica.....	27
3.2	Demais Equipamentos de um parque eólico.....	29
3.2.1	Transformadores.....	30
3.2.2	Painéis Elétricos.....	30
3.2.3	Cabos.....	31
3.3	Efeito Esteira.....	31
3.4	Medição do Vento.....	35
4	Projeto de Parques Eólicos.....	36
4.1	Desenvolvimento de um projeto eólico.....	36
4.2	Layout de Central Eólica.....	39
4.2.1	Mapeamento do processo de instalação de um parque eólico no Brasil.....	42
4.2.2	Parque eólico experimental.....	47
4.2.3	Exemplo – Análise de viabilidade de unidade de geração eólica.....	48
5	Conclusão.....	52
	Bibliografia.....	53

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica é cada vez mais utilizada no mundo, pois se trata de uma fonte limpa, sustentável e economicamente viável. Esta energia, em conjunto com outras fontes renováveis (Solar, Biomassa, Geotérmica, Maremotriz, etc.) com investimentos poderá conciliar as necessidades energéticas de uma sociedade, assim substituindo métodos que prejudicam mais o meio ambiente, como energia nuclear, energia termoelétrica, entre outras. Tem origem na energia solar. É uma forma de energia cinética produzida pelo aquecimento diferenciado das camadas de ar, originando uma variação da massa específica e gradientes de pressão. Além disso, também é influenciada pelo movimento de rotação da Terra sobre o seu eixo e depende significativamente de influências naturais, como: continentalidade, maritimidade, latitude, altitude. As formas de aproveitamento dessa energia estão associadas à conversão da mesma em energia mecânica e elétrica.

Entre as fontes renováveis, a energia eólica apresenta-se como aquela com boas possibilidades para gerar energia elétrica em grandes blocos devido ao progressivo desenvolvimento tecnológico que vem ocorrendo nos últimos anos.

A energia eólica é medida utilizando sensores de velocidade e direção do vento. Os dados são armazenados num sistema de aquisição de dados (datalogger). Em geral, a velocidade do vento é medida em m/s (metros/segundo). O principal resultado a ser obtido é a velocidade média do vento, mas é importante conhecer também a velocidade máxima, intensidade de turbulência, além da distribuição estatística das velocidades. Junto com o sensor de velocidade são utilizados os sensores de direção, registrando a predominância dos ventos.

A disponibilidade de energia eólica não é constante ao longo do ano. Na prática, verifica-se que o recurso eólico apresenta variações temporais em várias ordens de grandeza: variações anuais (em função de alterações climáticas), variações sazonais (em função das diferentes estações do ano), variações diárias (causadas pelo micro clima locais), variações horárias (brisa terrestre e marítima, por exemplo) e variações de curta duração (rajadas). A variação espacial da energia eólica também é muito grande.

A topografia e a rugosidade do solo também têm grande influência na distribuição de frequência de ocorrência dos ventos e de sua velocidade em um local.

A quantidade de energia eólica extraível numa região depende das características de desempenho, altura de operação e espaçamento horizontal dos sistemas de conversão.

Para qualquer fluido em movimento, a velocidade do fluxo aumenta na medida em que este se afasta das superfícies que o delimitam. Portanto, a velocidade do vento aumenta com a altura em relação à superfície da Terra, de forma dependente da rugosidade do terreno. Em terrenos planos (baixa rugosidade) esta variação é muito menos significativa do que em terrenos irregulares (alta rugosidade), sendo as áreas urbanas classificadas nesta segunda categoria. Por isso, as máquinas eólicas são geralmente instaladas em torres elevadas, onde as velocidades são significativamente maiores do que na superfície.

Um parque eólico ou usina eólica é um local, em terra (onshore) ou em mar (offshore), que se destina à produção de energia elétrica a partir dos ventos. Uma usina eólica é constituída por vários aerogeradores, um edifício de comando (inclui geralmente uma sala de comando, um gabinete, um armazém e instalações sanitárias) uma subestação, aos quais todos os aerogeradores estão ligados através de uma rede de cabos enterrados, e caminhos de acesso a cada aerogerador (MENDES; COSTA; PEDREIRA, 2002).

O melhor aproveitamento da energia eólica em uma determinada região passa por um minucioso projeto de um parque eólico, onde todas as variáveis sejam elas climáticas, geográficas, econômicas, etc. são postas em questão para análise. Ao final do processo, o projeto recebe ou não ordem de execução.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é o de apresentar as etapas de elaboração de projeto e construção de um parque eólico, bem como fazer uma análise comparativa entre diferentes parques, apresentando suas vantagens e desvantagens.

Objetiva-se também analisar fatores (positivos e negativos) que influenciam na geração de energia eólica. No decorrer do trabalho, serão apresentados aspectos

técnicos, climáticos e econômicos que precisam ser levados em consideração, proporcionando uma otimização geral de um layout de parque eólico, mostrando fatores como, por exemplo, o espaçamento e disposição de aerogeradores para se obter redução nas perdas causada por efeito esteira.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresenta a seguinte distribuição: o capítulo primeiro é introdutório e apresenta uma contextualização, define os objetivos e apresenta sua estrutura.

No segundo capítulo, traça um panorama da energia eólica, tanto no Brasil quanto a nível mundial, com dados atualizados sobre estrutura montada, potência gerada e investimentos no ramo da energia eólica.

O capítulo três fornece um embasamento teórico, fundamental para a compreensão do desenvolvimento do layout/design de um parque eólico.

No capítulo 4 o leitor se familiariza com o passo a passo de um projeto de parque eólico, bem como documentação e laudos necessários para tal.

O capítulo 5 traz a conclusão do trabalho.

2 PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA

2.1 ENERGIA EÓLICA NO MUNDO

Europa

As fontes de energia renováveis constituíram cerca de 9% da nova potência acrescentada às redes elétricas da Europa no ano passado, em um sinal da rápida mudança do continente para longe dos combustíveis fósseis.

Mas os líderes da indústria disseram que estavam preocupados com a falta de apoio político além de 2020, quando os objetivos da UE para energias renováveis terminam.

Dos 24,5 GB de novas capacidades instaladas em toda a UE em 2016, 21,1GW - ou 86% - eram de energia eólica, solar, biomassa e hidrelétrica, eclipsando a marca de alta água anterior de 79% em 2014.

A energia eólica atingiram o carvão para se tornar a segunda maior capacidade de energia da UE após o gás, embora devido à natureza intermitente da tecnologia, o carvão ainda atende a mais demanda elétrica do bloco.

Líder no segmento de energia renovável, a Dinamarca, que tem 5,6 milhões de habitantes (menos da metade da população de São Paulo), tem a meta de produzir metade de sua demanda energética com a força do vento até 2020. Nos últimos horários de pico do país, as fazendas de vento nem estavam operando com a sua capacidade total (4,8GW) para atender a demanda energética.

Aproximadamente 75% da capacidade eólica do país vêm de parques eólicos *onshore*, que têm forte apoio do governo.

China

Mais de 92 mil turbinas eólicas já foram instaladas na China, quase o dobro da capacidade dos Estados Unidos, mas elas estão parcialmente ociosas por diversas razões. São capazes de gerar 145 gigawatts de eletricidade. Existem limitações das linhas de transmissão para as regiões consumidoras de energia e o sistema de preços vigentes ainda acabam privilegiando usinas de carvão poluidoras. Este problema está

sendo enfrentado pelas autoridades chinesas, que pretendem continuar ampliando sua capacidade de geração de energia não poluente, mesmo contrariando as autoridades locais.

Os custos dos equipamentos eólicos estão se reduzindo na China dado o volume de seu uso e as áreas que possibilitam sua utilização ficam no oeste e norte, longe dos centros principais de consumo mais próximas do litoral que também passa por uma desaceleração do crescimento econômico. Os chineses afirmam que são as dores do crescimento.

O governo chinês promete continuar investindo pesadamente na energia eólica com um programa de US\$ 360 bilhões até 2020 nas energias renováveis. Isto depende da capacidade chinesa de superar problemas políticos e práticos das autoridades locais.

As reformas que provocam mudanças de preços são dolorosas e afetam as autoridades locais que são poderosas, inclusive na alocação de outros recursos como os relacionados com a construção civil, tanto na infraestrutura como nas edificações. Ainda que seja uma economia muito centralizada com o comando do Partido Comunista, as autoridades centrais necessitam manter um razoável equilíbrio político de diversas facções que lá existem ainda.

Estados Unidos

A geração eólica superou as hidrelétricas como a maior fonte de energia renovável nos Estados Unidos após o segundo melhor trimestre já registrado para o setor em termos de novas instalações, em 2016.

As instalações eólicas totalizaram 82.138 MW no fim de 2016, o suficiente para alimentar 24 milhões de residências, segundo a Associação Americana de Energia Eólica em seu relatório de mercado para o quarto trimestre daquele ano. Para comparação, a capacidade hidrelétrica dos EUA está em torno de 80 mil megawatts, segundo a Administração de Informações de Energia (AIE).

As instalações de turbinas eólicas subiram para 6.478 no quarto trimestre de 2016, respondendo por 80% de todas as instalações realizadas no ano passado. O quarto trimestre registrou o maior aumento da capacidade instalada desde 2012.

Os 8.303 MW adicionados no ano representam mais de 13,8 bilhões de dólares em investimentos.

São três fabricantes de turbinas – General Electric, Vestas e Siemens – responderam por até 95% do mercado de turbinas dos EUA em 2016.

2.2 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

A localização e as condições climáticas do Brasil favorecem a utilização da energia eólica para a produção de energia elétrica. Climas quentes e úmidos (climas propícios para a criação de ventos fortes) são um dos principais aspectos favoráveis do país para o investimento de tecnologias no setor eólico. Segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) estudos indicam que o país possui um potencial superior a 60.000 megawatts. Ainda de acordo com a ANEEL o Brasil possui 248 megawatts de capacidade instalada de energia eólica. As regiões litorâneas do Nordeste, Sul e Sudeste foram identificadas como os maiores potenciais de geração de energia eólica do Brasil. O Nordeste tem capacidade de 144,29 TWh/ano (Terawatt-hora ao ano), no Sudeste é de 54,93 TWh/ano e na região Sul é de 41,11 TWh/ano (CIÊNCIA ATUAL, 2015).

Maior diversificação de fontes energéticas, tarifas mais baratas e energia limpa de melhor qualidade para a população brasileira. Essa é a perspectiva para o setor elétrico nos próximos anos diante do crescimento da capacidade de geração eólica no país, líder na produção desse tipo na América Latina.

A capacidade de energia eólica em operação no país alcançou 3.428 MW em junho de 2014, representando um aumento de 63,8% em comparação ao mês de junho de 2013 que tinha uma capacidade de 2.093 MW. Em 2014, no primeiro semestre, foi adicionado ao Sistema Interligado Nacional (SIN) 1.226,8 MW de energia eólica, representando 35,2% do acrescentado ao sistema, considerando todas as fontes (Jornal da energia, 2014). Com os investimentos em energia eólica o crescimento na matriz brasileira deve continuar em expansão. A perspectiva no país deve alcançar 22.439 MW em 2023, de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2022), já foram outorgados empreendimentos que aumentaram em 10 mil MW até 2018 (Jornal da energia, 2014).

O setor de energia eólica no Brasil passou a ter, em 2016, capacidade instalada de 10 gigawatts (GW) em cerca de 400 parques com mais de 5,2 mil aerogeradores em

operação. Com isso, a fonte de energia renovável, considerada moderna, representa 7% da matriz energética brasileira e registra 80% de nacionalização.

Pelos números do setor, em 2015, a energia eólica abasteceu mensalmente uma população equivalente a toda a região Sul do país e gerou 41 mil postos de trabalho. Os investimentos feitos desde 1998 somam R\$ 60 bilhões. Ainda sobre o ano de 2015, a energia eólica teve participação de 39,3% na expansão da matriz, enquanto a hidrelétrica ficou com 35,1%, seguida da termelétrica (25,6%), passando a ocupar o terceiro lugar em participação na matriz energética brasileira. O Brasil ficou na 5ª posição no ranking mundial de expansão da capacidade instalada de geração eólica em 2016.

A capacidade instalada total de geração de energia elétrica do Brasil atingiu 152.563 MW no último mês de abril, incluindo Geração Distribuída – GD. Dentre as fontes que mais expandiram, o destaque é para geração eólica que cresceu 20% nos últimos doze meses, totalizando 10.404 MW. As informações são do Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia.

Em comparação com o mesmo mês de abril de 2016, sem considerar GD, houve um acréscimo de 9.542 MW, sendo 6.314 MW de geração de fonte hidráulica, 1.741 MW de fonte eólica, 1.485 MW de fontes térmicas e 2 MW de fonte solar, considerando os Ambientes de Contratação Regulada e Livre (ACR e ACL).

A geração distribuída atingiu 108 MW de capacidade instalada em abril de 2017, sendo composta por 7MW de CGH, 16 MW de térmica, 10 MW de eólica e 75 MW de solar.

Na matriz de produção de energia elétrica, considerando dados do mês de março de 2017, a geração hidráulica correspondeu a 80,3% do total gerado no país. Já a participação da geração por fonte térmica ficou em segundo lugar, com 15,6% da produção e a fonte eólica com 4,1%.

O mês de abril também registrou 135.277 km de linhas de transmissão em operação no Brasil com tensão maior ou igual a 230 KV. No mês, entraram em operação comercial 13,5 km de linhas de transmissão.

O Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro é um documento oficial elaborado pela Secretaria de Energia Elétrica do MME com informações atualizadas e consolidadas sobre a operação eletroenergética no Brasil, permitindo o registro e acompanhamento de temas relevantes do Setor Elétrico, tais como a expansão e o desempenho dos sistemas de geração, transmissão e distribuição, as condições hidrometeorológicas e a política operativa adotada, o comportamento do mercado consumidor e as ocorrências de maior impacto ao Sistema Elétrico Brasileiro (SEB).

A região Nordeste continua a ser o maior polo brasileiro de geração de energia eólica. Segundo a CCEE (Comercialização de Energia Elétrica), o Rio Grande do Norte foi o principal estado gerador no Brasil no ano de 2016. As usinas potiguares produziram 1.206 MW médios no período, número que representa um aumento de 50% em relação a 2015.

No mês de março de 2017, o fator de capacidade médio das usinas eólicas da região Nordeste reduziu 9,0 p.p. com relação ao mês anterior, atingindo 24,4%, com total de 2.046,6 MW médios de geração verificada no mês. Em relação ao acumulado nos últimos 12 meses, o fator de capacidade médio da região Nordeste aumentou 4,1 p.p. em comparação ao desempenho dos 12 meses anteriores, atingindo o valor de 42,3%.

O SEBRAE lançou, em 13 de abril de 2017, durante o Encontro de Negócios em Energias Renováveis promovido em São Paulo, um estudo sobre o potencial de crescimento da cadeia de energia eólica no Brasil e as oportunidades de negócio para as empresas diretamente ligadas a ela. De acordo com o trabalho, a capacidade instalada em parques eólicos deve dobrar até 2025, duplicando também a participação do setor no Produto Interno Bruto do país. A expectativa é que um novo mercado de operação e manutenção de parques eólicos se abra nos próximos dois anos para pequenas empresas brasileiras.

Há uma concentração de fabricantes de componentes em estados do Sudeste, embora os parques sejam mais abundantes no Nordeste. O estado com maior capacidade instalada é o Rio Grande do Norte, seguido pela Bahia. O estudo também aponta a presença de 14 empresas que atuam com mini e microgeração de energia eólica no país, negócio que tende a ganhar mercado.

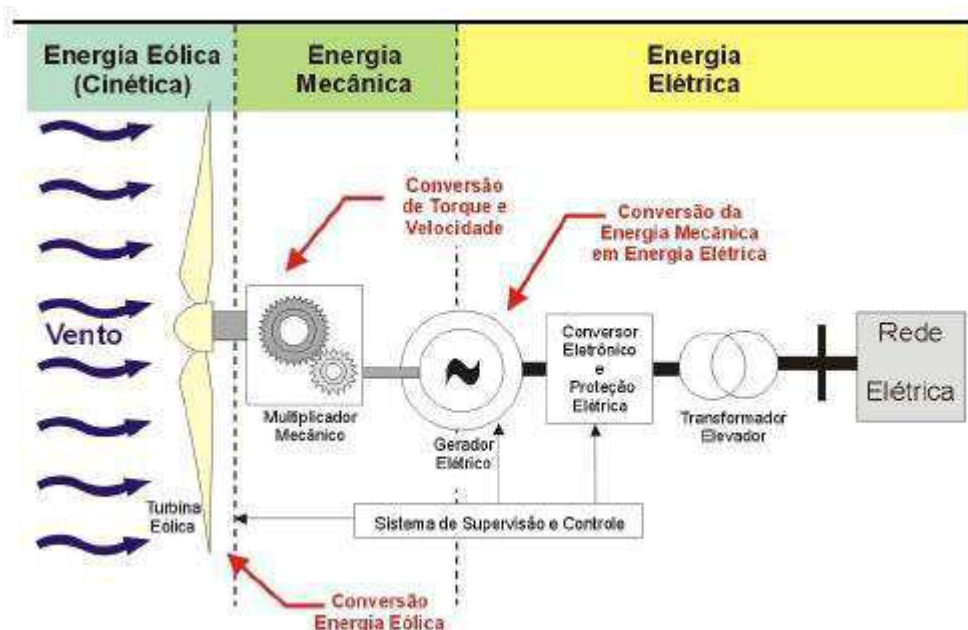
O Encontro de Negócios em Energias Renováveis integra a Frente de Economia Verde do Projeto Plataforma, iniciativa do SEBRAE em parceria com o Banco Interamericano de Desenvolvimento e com a Organização dos Estados Ibero-americanos. Dez empresas âncoras que participaram do primeiro dia de negociações, enquanto outras 60 pequenas empresas, aproximadamente, participaram das atividades.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 AEROGERADORES

Aerogeradores são os equipamentos que realizam a conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica, disponibilizando-a para a rede elétrica em seus terminais de saída. De uma maneira geral, alguns modelos de aerogeradores é constituído principalmente pela turbina eólica, multiplicador mecânico, gerador elétrico e pelos sistemas de conexão elétrica e controle. Um resumo esquemático segue na figura XX

Figura 1 – Composição interna de um aerogerador

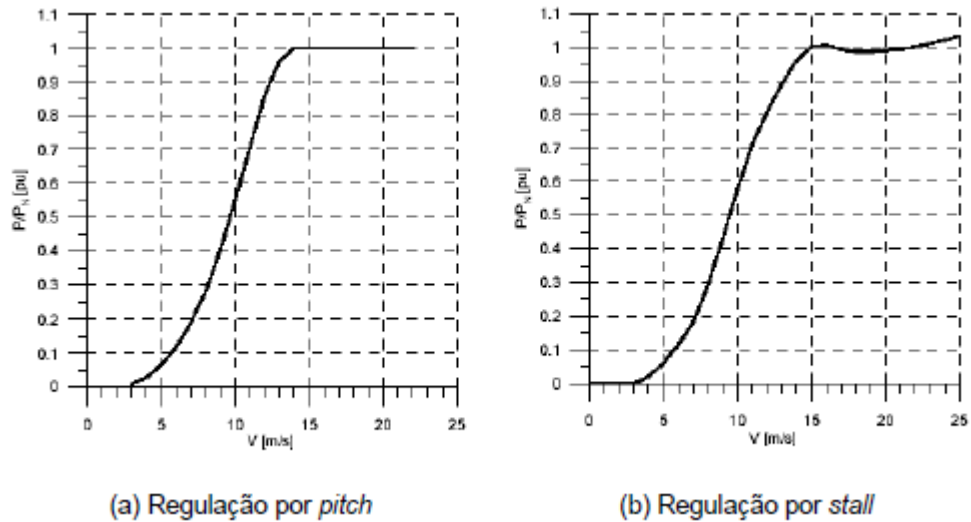


Fonte: Energia Eólica – Princípios e Tecnologia (2004)

Um fator muito relevante quando se trata de aerogeradores é o relativo à forma utilizada para regulação da potência mecânica que é extraída dos ventos pela turbina eólica. Esta regulação da potência pode ser basicamente dividida em dois tipos principais: por deslocamento aerodinâmico do vento (conhecido como stall) ou pela modificação do ângulo de pás (ou ângulo de de passo) em relação ao vento incidente (conhecido como pitch). A figura 2 apresenta duas curvas de potência característica para

turbinas com regulação de potência por: (a) variação do ângulo de passo das pás (pitch) e (b) deslocamento aerodinâmico (stall).

Figura 2 – Curvas de potência para turbinas



Fonte: Energia Eólica – Princípios e Tecnologia (2004)

Aerogeradores com regulação pitch permitem, de uma maneira geral, um controle mais preciso da potência mecânica entregue ao gerador elétrico, sobretudo na proximidade da potência nominal, enquanto máquinas com regulação stall exigem uma mecânica mais robusta, pois a limitação da captação da energia do vento é efetuada de forma passiva por processos aerodinâmicos.

A escolha de determinado tipo de regulação de potência, em princípio, não tem relação com o tipo de gerador e a topologia elétrica empregada, mas sim com a relação custo/benefício praticada pelo fabricante. (ROSAS, ESTANQUEIRO 2003).

Para o caso dos aerogeradores para instalação onshore, os esforços mundiais têm sido no sentido da maximização da energia gerada por meio do desenvolvimento de aerogeradores com torres mais altas (acima de 100 m), rotores e potências cada vez maiores, além de um refinamento contínuo dos projetos e dos processos produtivos, visando a redução do custo de material e das cargas estruturais no aerogerador, e para sua maior eficiência, confiabilidade e durabilidade (GWEC, 2012; RECHARGE, 2014). Em termos de componentes o foco das inovações neste segmento tem sido principalmente em:

- trem de acionamento híbrido de média velocidade – integrando caixa de engrenagem e gerador. Este conceito permite o aproveitamento das vantagens de cada abordagem –

redução de peso e tamanho, maior confiabilidade, além de redução no custo. Já há modelos de 3,0 MW em teste e também projetos para aerogeradores de 10 MW, neste caso para uso onshore, desenvolvidos por empresas como a finlandesa Moventas, a alemã Winergy/Siemens e a inglesa Romax (HOPWOOD, 2011; RECHARGE, 2014);

- tecnologia de acionamento direto – novas gerações estão surgindo, com geradores do tipo permanent magnet synchronous generator / gerador síncrono de ímã permanente (PMSG), mais compactos de menor peso e menor número de partes móveis (HOPWOOD, 2011);
- torres altas - de madeira para alturas de hub de 200 m - em desenvolvimento pela Timber Tower alemã; torres com esqueleto interno de aço envolto em tecido arquitetônico de alto módulo – em desenvolvimento pela GE/Wind Tower Systems;
- torres de concreto pré-moldado – mais baratas que as torres de aço para alturas acima de 100 m e de alta resistência à fadiga;
- aerodinâmica das pás – permitindo controle mais rápido e mais distribuído das cargas aerodinâmicas, proporcionando maior captura de energia (VARRONE, 2011). Os avanços aerodinâmicos incluem também o redesenho das seções extremas da pá (ponta e raiz);
- operações inteligentes – introdução de inteligência digital às pás e ao trem de acionamento e integração com o sistema de controle;
- materiais alternativos – para facilitar a produção, transporte e instalação dos componentes e/ou para sua maior durabilidade, incluindo pás, torre, caixa e componentes elétricos;
- padronização e modularização, resultando em maior número de componentes iguais ou similares e proporcionando ganhos de escala;
- redução dos custos de fabricação dos componentes e montagem – através da implantação de técnicas, conceitos e ferramentas da produção enxuta (lean manufacturing).

3.1.1 ÁREA DE TESTES PARA AEROGERADORES

Alguns fabricantes instalam seus aerogeradores em áreas próximas às suas instalações devido à facilidade em acompanhar os ensaios, mas na maioria dos casos os aerogeradores são instalados em áreas projetadas especificamente para a realização de

ensaios em aerogeradores e que pertencem a centros de pesquisa ou empresas de serviço de medição.

A área de testes deve apresentar relevo simples, com baixa declividade e ser livre de obstáculos. Caso o relevo do local possa causar uma variação na velocidade do vento entre a torre de medição e o aerogerador superior a 1%, deve-se realizar a calibração do local, que consiste na instalação de duas torres anemométricas, uma no local do aerogerador e outra no ponto definitivo onde será mantida a medição anemométrica. O objetivo é levantar uma tabela com os coeficientes de correção e incertezas entre os dois pontos para diferentes direções de incidência do vento. A IEC define os critérios para verificação da necessidade de realização da calibração da área. De forma simplificada, a inclinação do terreno não pode ser superior a 3% na área definida pelo círculo em volta do aerogerador com raio de duas vezes a distância, L , entre o aerogerador e a torre de medição, aumentando este limite para 5% e 10% entre as áreas delimitadas entre $2L$ a $4L$ e $4L$ a $8L$, respectivamente. Também se deve verificar a máxima variação de altitude do terreno em relação ao plano.

Figura 3: Estação de Testes de Aerogeradores do Risø em Høvsøre (RISØ, 2010).

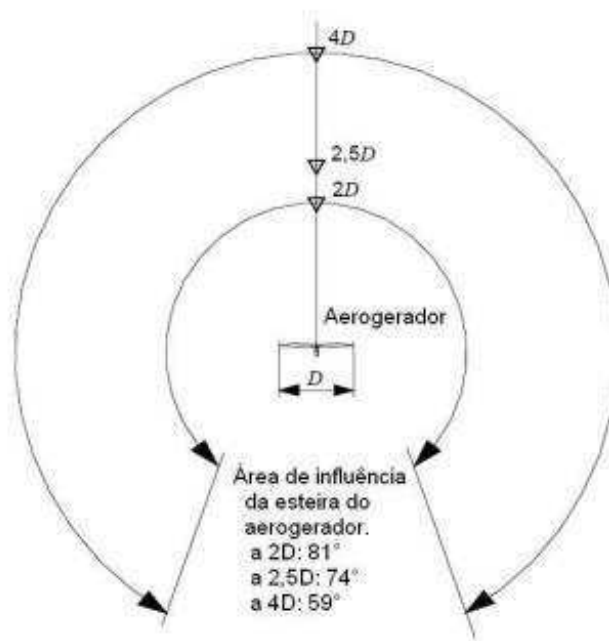


Fonte: Riso - Hovshore (2015)

A torre de medição não deve ser instalada muito próxima ao aerogerador para não causar interferência no vento, nem muito longe, pois diminui a correlação entre a medição da velocidade do vento e da eletricidade gerada. A torre de medição deve ser instalada a uma distância entre 2 a 4 vezes o diâmetro do rotor, D , recomenda-se utilizar a distância de $2,5D$.

Uma vez instalada, as medições não são válidas para qualquer direção do vento, pois caso a torre anemométrica fique posicionada atrás do aerogerador em relação à incidência do vento, a velocidade será perturbada pela esteira aerodinâmica formada atrás do aerogerador. Desta forma, foram definidos setores, que variam com a distância da torre, onde as medições não são válidas e devem ser descartadas. A figura 4 apresenta os limites de distâncias recomendadas e respectivos setores onde as medições são válidas.

Figura 4: Limite de distância para medições



Fonte: Riso - Hovshore (2015)

3.1.2 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA DE AEROGERADORES

A medição da potência do aerogerador deve ser realizada através de um dispositivo que se baseie na medição da corrente e tensão em cada fase e que seja instalado após as cargas auxiliares do aerogerador, uma vez que se deseja saber a potência líquida disponibilizada.

Geralmente a saída elétrica será trifásica, com frequência de 50 ou 60 Hz, e tensão na faixa de 380-415 V. As abordagens recomendadas são os métodos dos 3 wattímetros, ou dos 2 wattímetros quando não se tem neutro. Ambos permitem a medição de uma carga trifásica balanceada ou desbalanceada, conectada em Y ou Δ .

3.1.3 POTÊNCIA DE TURBINA EÓLICA

A potência de uma turbina eólica é obtida através da conversão de energia eólica em torque, o que é rodar as pás do rotor da turbina. A quantidade de energia transferida para o rotor dependerá da densidade do ar (ρ), da área das lâminas do rotor (A) e de velocidade do vento (v_0).

Deste modo, a existência de uma massa de ar (m), que se move de uma maneira constante e uniforme a uma velocidade v_0 , tem associado a si uma energia cinética será a energia disponível para uma turbina eólica.

Uma vez que a energia disponível no vento associada com o movimento desta massa de ar, que se aproxima à velocidade v_0 as lâmina do rotor de uma turbina eólica é dada por:

$$p_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial m}{\partial t} \cdot v_0^2 \quad (1)$$

À medida que o fluxo de massa de ar que atravessa as pás do rotor é dado por:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \rho A v_0 \quad (2)$$

No caso de uma turbina eólica, as pás do rotor de raio rotor a girar, a área varrida pelas pás corresponde a uma área circular:

$$A = \pi r_{rot}^2 \quad (3)$$

Substituindo (3) em (2) e, em seguida, (1) e rearranjando, obtemos a seguinte equação da potência disponível no vento para a área correspondente à área varrida pelas pás da turbina:

$$p_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial m}{\partial t} \cdot v_0^2 = \frac{1}{2} (\rho A v_0) v^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot r_{rot}^2 \cdot v^3 \quad (4)$$

Como pode ser visto a energia eólica disponível irá variar com o cubo da velocidade, ou seja, se a velocidade dobrar, a potência aumenta oito vezes, enquanto que o aumento da área varrida pelas pás para o dobro fará com que a potência aumente duas vezes. Portanto, chega-se à conclusão que, embora esses dois fatores sejam importantes, ao escolher o local para a construção de um parque eólico, o valor a velocidade do vento no local é o mais relevante.

O coeficiente de uma turbina eólica expressa a eficiência da conversão de energia eólica em energia elétrica, porque apenas uma fração da energia cinética total do ar que atravessa as pás da turbina pode ser convertida em energia mecânica no rotor.

Supondo que a velocidade do vento não perturbado que incide nas pás da turbina é v_0 e a velocidade do vento do lado oposto das pás, ou seja, que “sai” da turbina (vento turbulento e com velocidade reduzida em relação a v_0 é v_{w0} , então a potência mecânica teórica máxima disponível no veio da turbina é dada por:

$$P_{mec_teo} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial m}{\partial t} (v_0^2 - v_{w0}^2) \quad (5)$$

De acordo com 1,2 e 3 segue-se que, se em (5), $v_{w0} = v_0$, a potência extraída do vento seria zero, pois seria como se as pás do rotor da turbina não existissem, e não há nenhuma conversão de energia. Se $v_{w0} = 0$, a potência mecânica no eixo seria zero, porque as pás da turbina não iriam deixar passar nenhum vento (atuando como uma parede), o que implica um fluxo de massa de ar zero, em seguida, também de potência nula.

Supondo que a velocidade média do vento que atravessa as pás do rotor é :

$$v_{med} = \frac{v_0 - v_{w0}}{2} \quad (6)$$

E que o fluxo de massa de ar que atravessa as pás do rotor pode agora ser dado por:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \rho \cdot A \cdot v_{med} \quad (7)$$

Obtém-se a seguinte equação para a potência mecânica máxima teórica substituindo (6) em (7) e depois em (5):

$$P_{mec_teo} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A (v_0^2 - v_{w0}^2) (v_0 - v_{w0}) \quad (8)$$

O razão entre a potência mecânica teórica e a potência total disponível no vento é conhecido como o coeficiente de potência teórico:

$$Cp_{teo} = \frac{P_{mec_teo}}{P_0} \quad (9)$$

A aplicação das equações (8) e (4) na equação (9) chega-se a:

$$Cp_{teo} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_{w0}}{v_0}\right) \left(1 - \frac{v_{w0}^2}{v_0^2}\right) \quad (10)$$

Note-se que Cp_{teo} representa um valor teórico do coeficiente de potência, e que a potência mecânica atual da turbina é menor do que a dada por (8), devido às perdas mecânicas. Assim o coeficiente de potência real da turbina que corresponde ao verdadeiro valor da potência mecânica extraída do vento é dado através de:

$$Cp = Cp_{teo} \cdot \eta \quad (11)$$

Onde η representa o rendimento das perdas mecânicas acima referidas e que varia entre 0 e 1, e depois facilmente chegar-se à conclusão de que:

$$Cp_{teo} = \frac{P_{mec_teo}}{P_0} \Leftrightarrow Cp = \frac{P_{mec_teo}}{P_0} \cdot \eta \Leftrightarrow Cp = \frac{P_{mec}}{P_0} \quad (12)$$

Apesar da equação (12) ser considerada à fórmula correspondente ao Cp , os fabricantes de turbinas eólicas normalmente já incluem as perdas elétricas na curva de Cp das turbinas, e é mais comum usar:

$$Cp = \frac{P_{mec}}{P_0} \quad (13)$$

Ao passar pelo rotor da turbina, o fluxo de ar acaba perdendo parte da sua energia cinética, sendo sua velocidade na saída da turbina menor que na entrada. Em 1919, o físico alemão Albert Betz, mostrou uma maneira de se extrair a máxima

potência desse fluxo, para isso, torna-se necessário que a velocidade da massa de ar na saída do rotor seja exatamente igual a um terço ($1/3$) da velocidade na entrada do rotor, ou seja, dois terços ($2/3$) da energia cinética contida na massa de ar que atravessa o rotor seria captada e convertida em energia elétrica.

3.2 DEMAIS EQUIPAMENTOS DE UM PARQUE EÓLICO

3.2.1 TRANSFORMADORES

Na base de cada torre do aerogerador, prevê-se a instalação de transformadores de potência “secos” visando à elevação do nível de tensão para se trabalhar com correntes menores e, conseqüentemente, cabos mais finos. A redução do nível da corrente circulante pode possibilitar também que haja menores perdas Joule no sistema, tendo em vista a variação das perdas com o quadrado da corrente.

Transformadores “secos” são selecionados devido a fatores como os listados pelo fabricante WEG:

- Segurança: sem risco de explosão e tão logo seja suprimida a fonte de calor, a resina não propaga o fogo e comporta a propriedade de autoextinção;
- Ecologicamente correto: não contamina o meio ambiente e não libera gases tóxicos;
- Custos de manutenção e instalação minimizados: construção simples, dispensando parede corta-fogo e tanque de recolhimento de óleo, havendo a possibilidade de instalação junto ao centro de carga;
- Otimização de espaço: dimensões reduzidas (na área ocupada por um transformador a óleo pode ser colocado um seco com o dobro da potência).

Na maioria dos projetos de parques eólicos, o último fator listado acima (otimização de espaço) é um dos que mais pesa na escolha do transformador adequado.

Para a distribuição de energia em parque eólico normalmente são propostas três alternativas distintas e comumente encontradas para a tensão de distribuição (13,8 kV – 24 kV – 34,5 kV), influenciando, desta forma, no dimensionamento dos transformadores, dos cabos e de outros equipamentos. A análise comparativa das alternativas é muito empregada nos projetos e visa analisar, entre outros fatores, as

perdas, o nível de corrente e a seção dos cabos, a fim de que a opção de melhor custo benefício seja a escolhida no projeto.

3.2.2 PAINÉIS ELÉTRICOS

Pode-se dizer que os painéis elétricos são invólucros devidamente protegidos e completamente montados, com todas as interconexões internas elétricas e mecânicas.

Abrigam uma combinação de equipamentos responsáveis por diversas funções, como por exemplo: manobra, controle, medição, sinalização, proteção e regulação. Relés, transformadores de corrente e de potencial, disjuntores, chaves seccionadoras, fusíveis, barramentos, para-raios e muflas são alguns dos dispositivos encontrados nesses cubículos e que serão discutidos na sequência, quando será mostrada uma estrutura de painel pensada para a central eólica do projeto.

3.2.3 CABOS

Na maioria dos projetos de centrais eólicas, os aerogeradores são distribuídos por uma extensa área buscando maximizar o rendimento do empreendimento. Devido à considerável quantidade de cabos necessários para concretização do projeto, especial atenção deve ser dada à escolha dos mesmos, já que estes costumam impactar profundamente no custo total da parte elétrica.

Além da escolha adequada do condutor, outras decisões que envolvem o tipo de método de instalação e também a maneira como os cabos estão dispostos no parque têm que ser definidas. Outro fator muito importante é o modo como os condutores estão dispostos. Por exemplo, realizar o dimensionamento considerando que estes pudessem estar distribuídos de duas formas: em trifólio e de modo planar.

3.3 EFEITO ESTEIRA

Outro aspecto a considerar é o chamado efeito de esteira. Uma vez que uma turbina eólica produz energia mecânica a partir da energia do vento incidente, o vento que “sai” da turbina tem um conteúdo energético muito inferior ao do vento que

“entrou” na turbina. De fato, na parte de trás da turbina forma-se uma esteira de vento turbulento e com velocidade reduzida relativamente ao vento incidente. A Figura 5 foi obtida injetando fumo branco no ar que passa através da turbina para mostrar a situação que se descreveu.

Figura 5 – Representação do efeito esteira

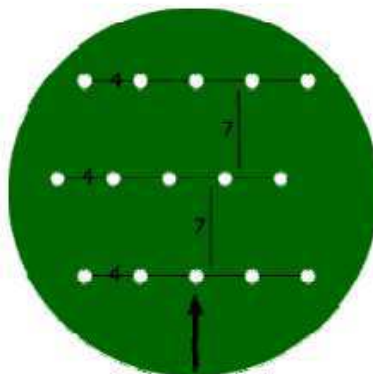


Fonte: Aspectos Técnicos Energia Eólica - Karina Miranda (2010)

As turbinas em um parque eólico costumam estarem dispostas tão próximas umas das outras que algumas podem ser afetadas pelo efeito esteira. Torna-se recomendável levar em consideração algumas consequências decorrentes desta interação tais como: redução na produção de energia nas turbinas eólicas posteriores, decorrente da perda de velocidade do vento. Um parque eólico na atualidade possui perdas de ordem considerável devido ao efeito esteira. O posicionamento geométrico das turbinas, a rugosidade do terreno e a constante absoluta de cada modelo constituem os parâmetros mais significativos nas perdas do conjunto. Ao longo de toda a vida útil do parque o efeito esteira constitui um ponto importante em sua produção, eficiência e funcionamento. A fase de projeto deve contemplar uma boa estimativa da forma como posicionar as turbinas eólicas para maximizar a produção e conseguir uma boa eficiência, neste contexto a modelagem do comportamento da esteira é utilizada para

aperfeiçoar o desempenho da produção de energia através da disposição das turbinas no parque. (Silva, José Ricardo Cardoso da – 2014)

Figura 6 – Disposição de aerogeradores em parque eólico



Fonte: Aspectos Técnicos Energia Eólica - Karina Miranda (2010)

As turbinas eólicas extraem energia do vento, reduzindo sua velocidade e agitando o escoamento na saída do rotor. Se as turbinas estiverem alinhadas na mesma direção do fluxo de ar, a turbina posterior receberá um vento com velocidade reduzida e em escoamento turbulento, reduzindo a sua eficiência de captação. A propagação desse fenômeno é o chamado “Efeito Esteira” e é um dos fatores mais impactantes na geração de energia elétrica (Moskalenko et al., 2010).

Tal fator é extremamente importante no planejamento de um parque eólico, pois pode influenciar significativamente o rendimento energético total. Negligenciá-lo pode levar a uma superestimação da produção de energia. Além disso, esse efeito induz cargas de vento variáveis causando vibrações excessivas e possíveis falhas por fadiga.

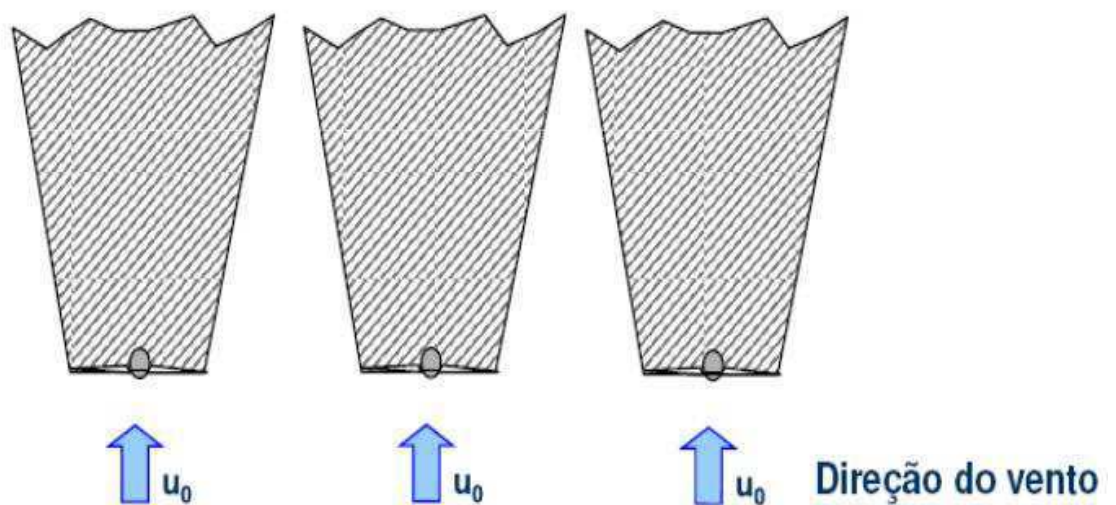
Para obter maior produção de energia e minimizar o custo de investimento relativo à implementação, é preciso adotar critérios na disposição dos aerogeradores nos parques eólicos.

Durante o processo de planejamento de um parque eólico, um aspecto importante a ser estudado é o melhor aproveitamento da área disponível. No entanto, um aumento no número de aerogeradores conduz à redução das distâncias entre cada turbina eólica, podendo influenciar a produção global do parque eólico pelo chamado “Efeito Esteira”.

Em um parque eólico, os aerogeradores podem estar totalmente ou parcialmente na sombra de vento de outros aerogeradores. Nesse caso, a geração de energia do parque é reduzida. Outro ponto a se destacar é que os aerogeradores que estão na sombra

sofrem cargas maiores. As figuras 7 e 8 mostram variações no posicionamento de aerogeradores. Na figura 7 estão dispostos de maneira que nenhuma máquina sofre efeito esteira (efeito sombra) de outra. Já na figura 8, as duas disposições de aerogeradores indicam efeito esteira total e parcial, respectivamente.

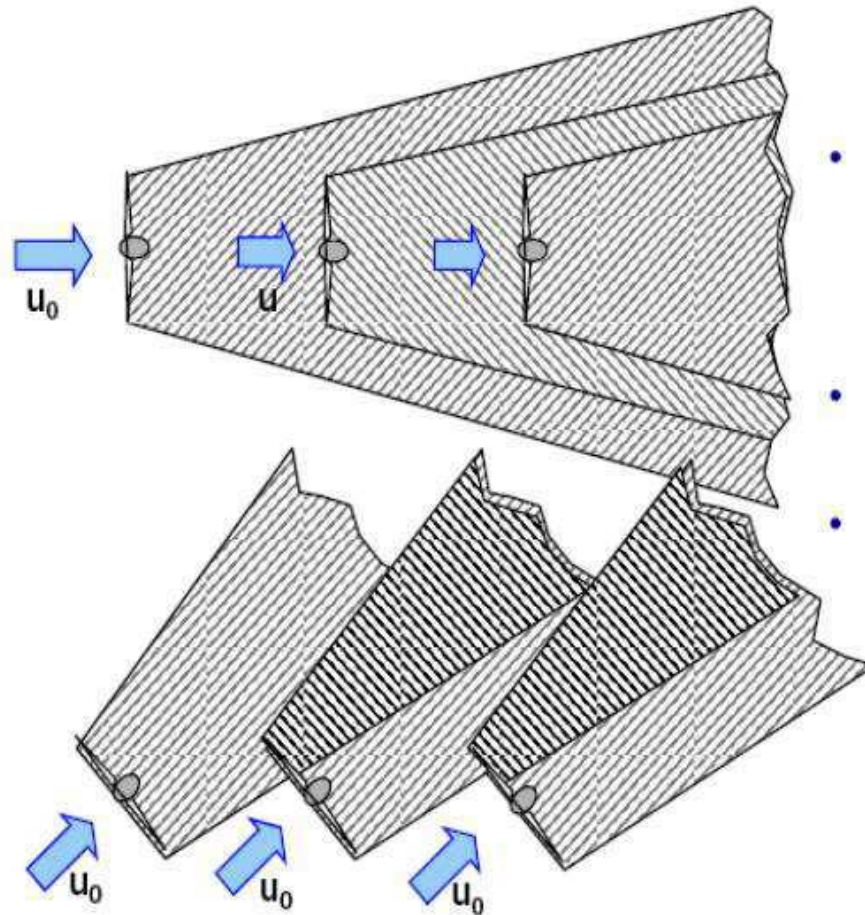
Figura 7 – Disposição de aerogeradores sem efeito esteira



Nenhuma influência do abrigo de vento

Fonte: Layout de Parques Eólicos - CTRN (2012)

Figura 8 – Disposição de aerogeradores com efeito esteira – Total e Parcial



Fonte: Layout de Parques Eólicos - CTRN (2012)

3.4 MEDIÇÃO DO VENTO

A velocidade do vento é o parâmetro mais crítico a ser medido e geralmente apresenta várias fontes de incerteza. A IEC define a velocidade do vento como a média (em 10 minutos) dos módulos da componente horizontal dos vetores de velocidade instantâneas (a cada 1 segundo), incluindo apenas as componentes lateral e longitudinal da turbulência, sem considerar a componente vertical.

Atualmente, apesar de existirem vários tipos de anemômetros e equipamentos alternativos, como o LIDAR e SODAR, que utilizam a emissão e recepção de luz e som, respectivamente para a quantificação da velocidade do vento, apenas o anemômetro de copos é aceito para este tipo de medição. No entanto, devem-se verificar suas principais características e configurações de montagem para garantir a máxima exatidão da medição.

Idealmente, a caracterização do recurso eólico num local deve ser feita com base em medições realizadas em vários pontos da zona envolvente e ao longo de um número significativo de anos. Na prática, a falta de tempo e de recursos financeiros leva a que as decisões sejam muitas vezes baseadas num único registo medido ao longo de apenas um ano.

A medição do vento é feita com instrumentação específica: anemómetros e sensores de direcção. É essencial que a instrumentação esteja bem exposta a todas as direcções do vento, isto é, os obstáculos devem estar situados a uma distância de, pelo menos, dez vezes a sua altura.

Apesar de não ser definido um limite mínimo de exatidão, o anemómetro deve ser calibrado antes e recalibrado após a campanha de medição e a diferença entre as curvas de regressão linear não podem apresentar diferença superior a 0,1 m/s entre as velocidades de 6 m/s e 12 m/s. Além disso, vários requisitos são exigidos dos laboratórios que realizam a calibração do anemómetro, inclusive provar que seus resultados estão coerentes com os de outros laboratórios através de testes de intercambiabilidade, onde os valores devem estar dentro de uma faixa de desvio de 1% do valor médio encontrado entre os laboratórios para o intervalo de velocidades entre 4 m/s a 16 m/s.

4 PROJETO DE PARQUES EÓLICOS

Um parque eólico ou usina eólica é um espaço (terrestre ou marítimo), onde estão concentrados vários aerogeradores (a partir de 5) destinados a transformar energia. Para a construção desses parques é necessário a realização do EIA/RIMA (Estudo e Relatório de Impacto Ambiental) pois a sua má localização pode causar impactos negativos como a morte de aves e a poluição sonora. Esse capítulo irá detalhar a metodologia para construção de uma unidade eólica gerador, assim como viabilidade económica e impactos ambientais.

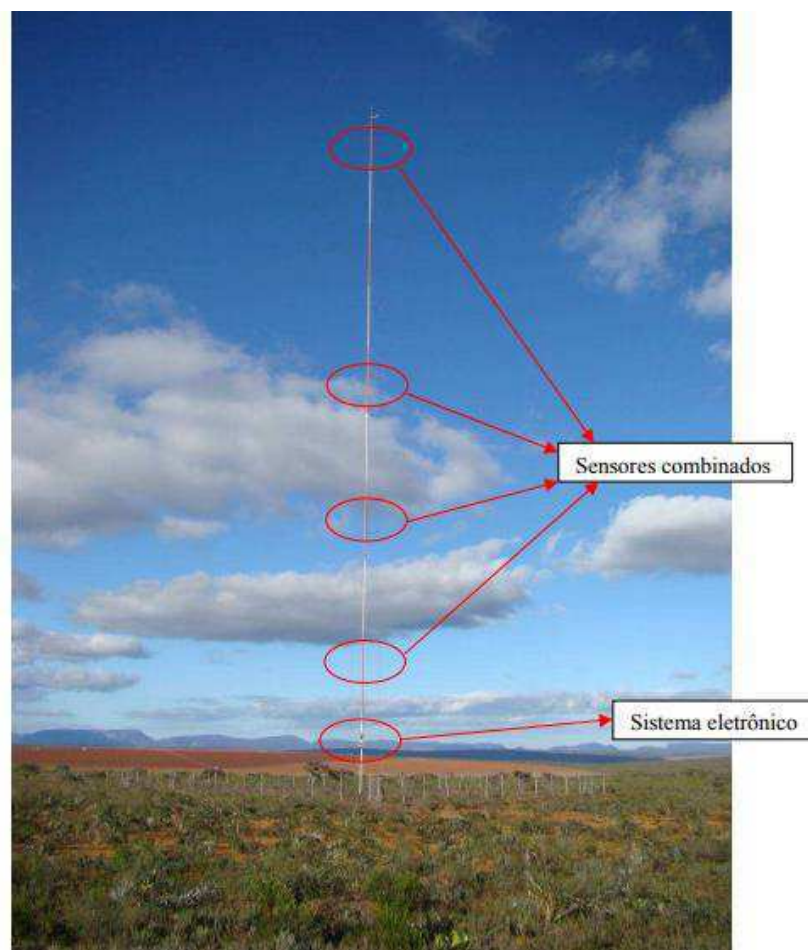
4.1 DESENVOLVIMENTO DE UM PROJETO EÓLICO

Instalação de torres anemométricas

A avaliação precisa do potencial de vento de uma região é o primeiro e fundamental passo para o aproveitamento do recurso eólico como fonte de energia.. Para isso, faz-se necessário a instalação de torres anemométricas durante o período de três anos. Esta atividade de pesquisa é dispensada de licenciamento ambiental por não causar impactos ambientais de acordo com a Resolução nº 4.180, de 29 de abril de 2011.

A torre anemométrica tem geralmente de 80 a 100 metros de altura, sua instalação é feita em uma base de concreto, ancoragem geralmente é feita por cabos de aço estaiados em uma área de 20m X 20m. Possuem medidores de temperatura, anemômetros, barômetros, sensores de direção dos ventos e um sistema eletrônico para armazenagem e envio de dados coletados.

Figura 9 – Instalação de torre anemométrica com sensores



Fonte: Layout de Parques Eólicos - CTRN (2012)

A instalação de torres de medição de ventos, assim como a realização de sondagens geotécnicas referentes à instalação dos parques eólicos, é dispensada de licenciamento ambiental, devendo ser objeto de prévia comunicação ao órgão ambiental, acompanhada de memorial descritivo, sucinto, com localização georreferenciada em planta com levantamento planialtimétrico, indicando, quando couber, a que empreendimento se refere. As prefeituras devem ser consultadas acerca da legislação aplicável sobre uso e ocupação do solo como devem fornecer a autorização para a implantação das torres anemométricas, condicionada à autorização dos proprietários das respectivas propriedades.

Aquisição ou arrendamento das propriedades

Inicialmente, após identificar a área de interesse para o projeto eólico, adota-se procedimento de procurar o proprietário para apresentação do projeto, e as condições de arrendamento. Na apresentação, são estabelecidas as condições de remuneração pelo uso da terra, na fase pré-operacional (projeto e/ou implantação) e na fase operacional.

Uma vez aceito o arrendamento por parte do proprietário, parte-se para a assinatura do contrato e averbação do mesmo na matrícula do imóvel. Isto feito, realiza-se o georreferenciamento da propriedade dentro dos parâmetros estabelecidos pelo Instituto de Colonização e Reforma Agrária - INCRA, e solicita-se a emissão de Certificado de Cadastro do Imóvel Rural – CCIR. Além disso, realizase o levantamento da situação da propriedade junto à Receita Federal, regularizando o pagamento do Imposto sobre a Propriedade Rural - ITR quando houver pendências.

Desta forma, o processo de licenciamento ambiental do Complexo Eólico tem como uma de suas consequências a promoção da regularização das Reservas Legais das propriedades rurais que se encontravam irregulares quanto a este tema. Porém, isso só acontece na fase de implantação, podendo então ocorrer de maneira a atender aos interesses do empreendedor em relação à instalação dos aerogeradores e às vias de acesso, gerando, assim, uma situação de conflito com os aspectos ambientais da propriedade.

Realização dos estudos ambientais para obtenção da Licença de Localização (LL) ou Licença Prévia (LP)

O empreendedor solicita ao órgão ambiental do estado o Termo de Referência (TR) para a realização dos estudos ambientais na forma de um relatório Ambiental Simplificado – RAS de acordo com a Resolução CONAMA 279/01 ou Estudo de Impacto Ambiental – EIA e respectivo Relatório de Impacto do Meio Ambiente – Rima, de acordo com a Resolução CONAMA 001/86. De uma maneira geral, ambos os estudos contêm, minimamente, os seguintes itens:

- Caracterização do empreendimento
- Diagnóstico Ambiental
- Avaliação de Impactos
- Proposição de medidas mitigadoras e/ou compensatórias
- Elaboração de Planos e Programas Ambientais Após a conclusão do estudo, é dada a entrada no processo de licenciamento ambiental junto ao órgão estadual competente com o objetivo de se obter a LL ou LP.

4.2 LAYOUT DE CENTRAL EÓLICA

O desenvolvimento do layout de uma central eólica é feito sob alguns importantes aspectos, a considerar:

1 – Avaliação/escolha do sítio: nessa primeira parte, os recursos eólicos e a infraestrutura do local são analisados de forma minuciosa. Esse aspectos são importantes porque com base neles o projeto irá avaliar a viabilidade energética do sítio, bem como sua conexão à rede e a condição do solo para construir. Entre os critérios gerais para seleção do sítio podemos citar a potência do vento, os caminhos de acesso a rede elétrica (conexão à rede). Se faz necessário também um uso otimizado da paisagem;

2 – Escolha do aerogerador: como foi explicitado no capítulo terceiro, a escolha do tipo e tamanho do aerogerador irá influenciar diretamente na potência instalada e no

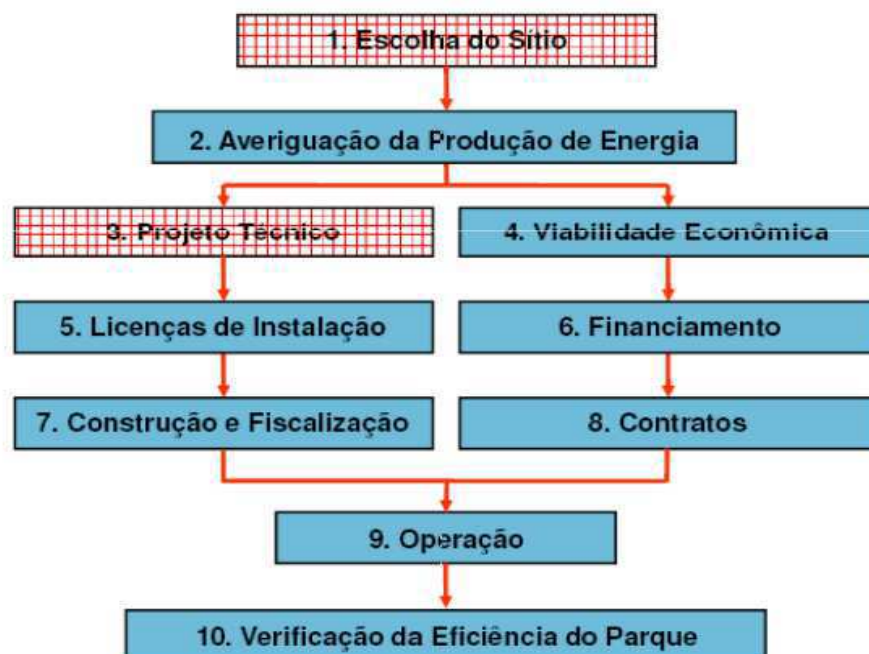
preço do projeto, bem como atender as exigências de transporte e montagem. Há de se avaliar a confiabilidade do fabricante. Escolhido o aerogerador, inicia o processo de sondagem no solo, definição do tipo de fundação e, por fim, controle de qualidade na construção da fundação;

3 – Financiamento/economia: uma avaliação dos apoios financeiros disponíveis, assim como os investimentos, custos e cálculos econômicos formam uma verdadeira engenharia econômica, que tem o poder de inviabilizar ou não o projeto da central eólica;

4 – Autorização: nessa etapa entra as avaliações ambientais, laudos, requerimento de construção e de conexão à rede e, por fim, o contrato de fornecimento de energia;

5 – Construção: na última etapa, é dado início a implementação do projeto e layout.

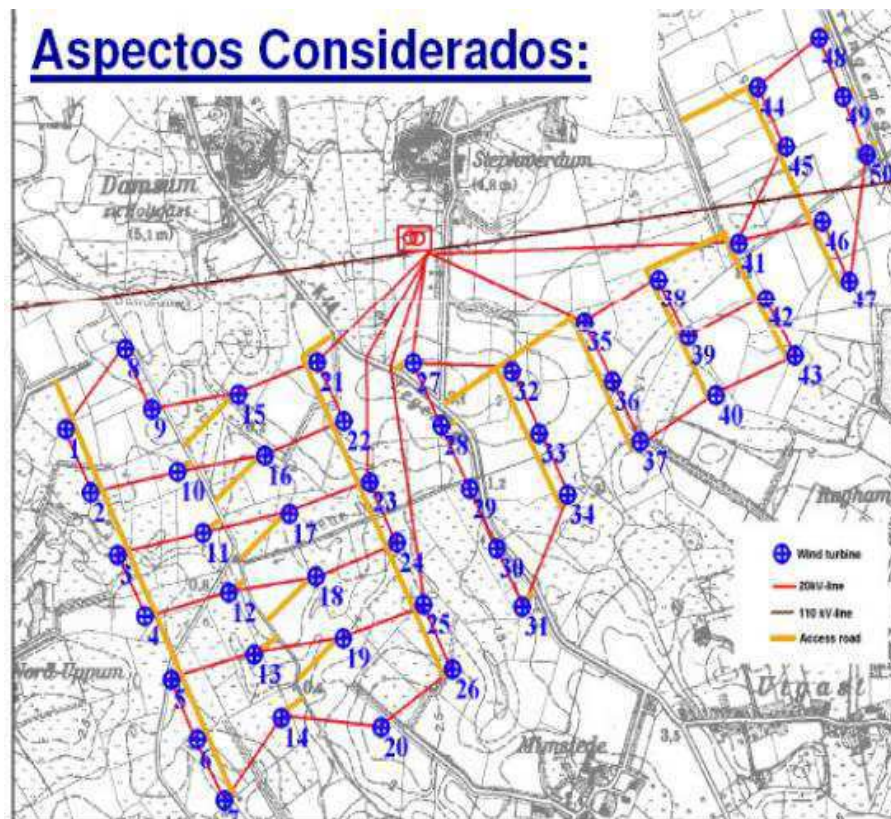
Figura 10 – Etapas projeto parque eólico



Fonte: Layout de Parques Eólicos - CTRN (2012)

A figura 11 exemplifica, de forma mais abrangente, os aspectos considerados no design de um parque eólico e a execução do projeto

Figura 11 – Design de parque eólico



Fonte: Layout de Parques Eólicos - CTRN (2012)

Com relação aos caminhos de acesso, seguem alguns critérios:

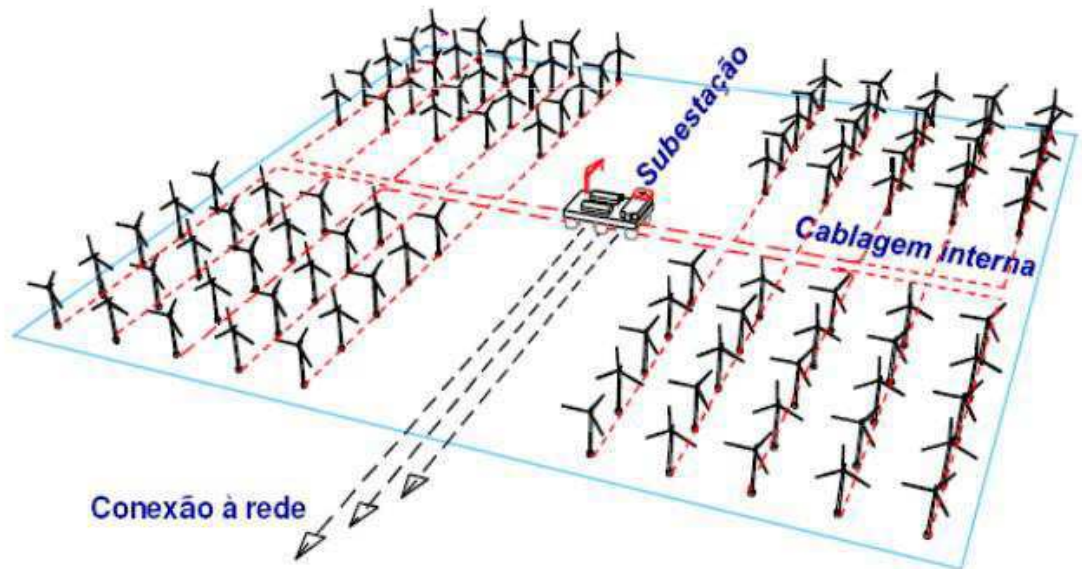
- Definir os caminhos já existentes que podem ser usados para o parque eólico;
- Conferir a largura, os raios de curvatura e a capacidade de carga necessários para o transporte;
- Verificar as pontes e passagens pela cidade;
- Definição do tipo de via a ser construída;
- Construção de ruas e áreas pavimentadas para a montagem.

Conexão à rede

- Cablagem interna do parque;
- Construção da subestação;

- Conexão até a rede de média e/ou alta tensão;
- Prova de qualidade elétrica dos aerogeradores e do parque eólico inteiro.

Figura 12 – Design parque eólico – conexão à rede



Fonte: Layout de Parques Eólicos - CTRN (2012)

Uso otimizado da área

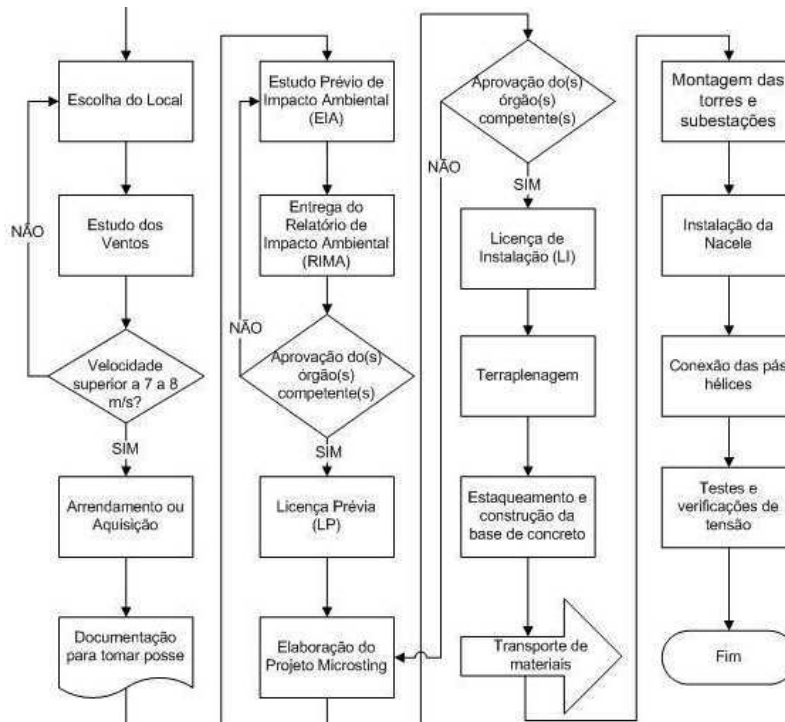
O design de um parque eólico deve levar em consideração também os impactos causados na região habitada, como por exemplo: emissão acústica, impacto de sombra das pás (ambos devem obter um parecer neutro e independente), interferência na transmissão de sinal de tele-transmissão e impacto visual. Em áreas industriais, o projeto deve dispor dos registros de emissões sonoras existentes na região, danos provocados por uma quebra de pá e posicionamento das turbinas na direção do vento predominante.

4.2.1 MAPEAMENTO DO PROCESSO DE INSTALAÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO NO BRASIL

O processo de implantação de parques eólicos no Brasil é composto por 19 etapas dentre operações, transporte e tomadas de decisão. Ao longo da implantação há o envolvimento de diversas partes interessadas, como: Desenvolvedor ou promotor dos projetos de parque eólicos (responsável pela execução de todas as fases de desenvolvimento do projeto que antecede a fase de construção); Gerenciadores de projeto (normalmente são fabricantes de aerogeradores ou firmas de engenharia); Empresas de transporte, movimentação e montagem (responsáveis respectivamente pelo transporte dos componentes até o parque, movimentação dos componentes dentro do parque e montagem final do aerogerador) e Empresas de O&M (Operação e Manutenção) (ABDI, 2014).

No Brasil, antes que um parque eólico comece a operar e até mesmo a ser construído, algumas atividades devem ser cumpridas para o atendimento das exigências legais brasileiras. No entanto, não são apenas obrigatoriedades legais que dificultam as empresas a instalarem usinas eólicas no Brasil, mas as condições logísticas (ABDI, 2014).

Figura 13 – Etapas instalação parque eólico no Brasil



Fonte: Próprio autor (2017)

Após ser selecionado o local de instalação começam os estudos dos ventos, analisando dados de velocidade e regularidade. Os ventos devem possuir densidade maior ou igual a 500 W/m^2 , a uma altura de 50 m e uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s para ser consideravelmente aproveitável (GRUBB; MEYER, 1993).

Os estudos iniciam-se colocando torres anemométricas, geralmente de 80 a 100 m de altura, que possuem medidores de temperaturas, barômetros, sensores eletrônicos de movimentação, anemômetros e um sistema de coleta de dados. As torres permanecem em média por 3 anos no local de instalação do parque e não necessitam de licenciamento ambiental, pois não geram nenhum tipo de impacto ambiental (STAUT, 2011).

Porém, o órgão ambiental precisa ser informado da instalação, acompanhado de memorial descritivo, sucinto, com as coordenadas do local em planta com levantamento planialtimétrico (planta com o maior número possível de informações do estudo), indicando, quando couber, a que empreendimento se refere (STAUT, 2011). As prefeituras devem ser consultadas acerca da legislação aplicável sobre uso e ocupação

do solo, pois fornecem a autorização para a implantação das torres anemométricas, condicionada à autorização dos proprietários das respectivas propriedades.

Procura-se o proprietário para apresentação do projeto e as condições de arrendamento. Nestas condições o proprietário da área arrendada receberá uma porcentagem em relação ao faturamento bruto da usina localizada no terreno (royalties) e um pagamento fixo por hectares. Geralmente, o proprietário do terreno pode continuar com seu trabalho (normalmente de criação de animais e plantio) ao redor das torres eólicas (STAUT, 2011).

Uma vez aceito o arrendamento por parte do proprietário, ocorre à assinatura do contrato e o registro do imóvel. Em seguida, realiza-se o georreferenciamento (atribuição de coordenadas a determinado objeto espacial) da propriedade dentro dos parâmetros estabelecidos pelo Instituto de Colonização e Reforma Agrária - INCRA, e solicita-se a emissão de Certificado de Cadastro do Imóvel Rural – CCIR. Realiza-se também o levantamento da situação da propriedade junto à Receita Federal, regularizando o pagamento do Imposto sobre a Propriedade Rural - ITR quando houver pendências (STAUT, 2011). Quando não ocorre o arrendamento, ocorre a aquisição (compra) quando o proprietário está disposto a vender. Porém, após a compra a empresa oferta a propriedade, em forma de arrendamento, para o proprietário que antecedeu o proprietário que efetuou a venda do terreno.

Inicialmente, elabora-se um Estudo Prévio de Impacto Ambiental (EIA) e um Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para a obtenção da Licença Prévia (LP) ou Licença de Localização (LL). O EIA é o conjunto de estudos com dados técnicos detalhados que busca identificar os problemas ambientais e os respectivos graus de magnitudes. Dessa forma, fornecendo informações que possibilitam a criação de medidas e ações de prevenção para mitigação dos riscos (FREITAS NETO, 2011). O RIMA é o relatório no qual descreve todas as conclusões obtidas no Estudo de Impacto Ambiental. É escrito de forma clara e objetiva, com ilustrações como mapas, quadros, gráficos, etc., de modo que se possa entender as vantagens e desvantagens do projeto, bem como todas as consequências ambientais de sua implantação (FREITAS NETO, 2011). Após a obtenção do licenciamento junto ao órgão estadual competente é feito o cadastramento do parque eólico junto a Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Para o cadastramento o empreendedor deverá apresentar cópia da licença ambiental compatível com a etapa do projeto, emitida pelo órgão competente. Na Licença Ambiental deverá constar o nome do agente interessado, a potência instalada do projeto, a data de emissão

e o prazo de validade (STUAT, 2011). Para a instalação dos equipamentos da usina é necessária outra Licença Ambiental, a Licença de Instalação (LI). Essa licença é obtida através da aprovação do projeto Micrositing, pelos órgãos ambientais competentes. O projeto Micrositing é composto pelo layout da usina, tipo de máquina, fabricante dos equipamentos, altura das torres, potência, previsão de geração anual e a capacidade máxima de produção. O projeto é elaborado pela empresa responsável pela instalação do parque.

Após a instalação dos equipamentos do parque eólico ser efetuado é necessário mais uma Licença Ambiental, a Licença de Operação (LO). Esta licença é obtida após o cumprimento das licenças anteriores, com as medidas de controle ambiental e condicionantes determinados nesta etapa de operação (CONAMA, 1997).

Para a criação do caminho principal inicialmente é removida a camada de terra vegetal, abertura da plataforma do caminho e a colocação da camada de saibro (terra batida). Em seguida são construídos aquedutos (canal que serve para conduzir água) e valetas de drenagem (valas para escoamento da água). Após serem decididos os locais dos aerogeradores abrem-se outros caminhos dentro do parque, feitos da mesma forma que o principal caminho (MENDES; COSTA; PEDREIRA, 2002).

Estaqueamento e construção da base de concreto: O estaqueamento consiste na colocação de estacas de concreto na base do aerogerador, para que o mesmo possa ser conectado ao solo. Em seguida é feito a base de concreto que sustentará a torre eólica.

Transporte de materiais: Os materiais recebidos para a construção do parque são transportados, geralmente, por caminhões (transporte rodoviário), mas como alguns lugares são distantes dos fabricantes os materiais são conduzidos primeiramente por navios (transporte marítimo). Geralmente os caminhões transportam pás, torres e geradores eólicos.

Montagem das torres e subestações: Com a chegada dos equipamentos, dar-se início as montagens das torres e a construção da subestação, para então realizar a interligação entre os cabos da torre e da subestação. Uma Subestação é uma instalação elétrica de alta potência, contendo equipamentos para transmissão, distribuição, proteção e controle de energia elétrica.

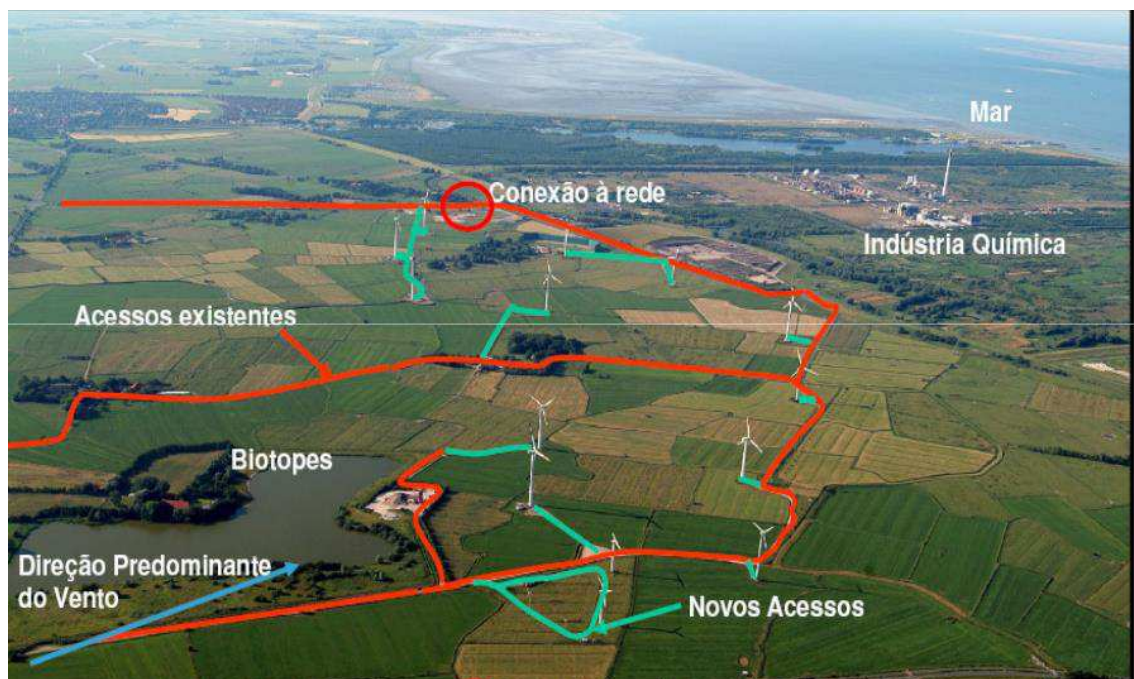
Instalação das naceles: Após a fixação das torres no solo, as naceles são instaladas no alto das torres. Nacele é uma carcaça que serve para proteger os componentes que ficam dentro dela, como: gerador, caixa multiplicadora, freios, embreagem, mancais, controle eletrônico, sistema hidráulico, entre outros componentes

elétricos e eletrônicos. Estes componentes mecânicos e elétricos são de suma importância para converter a força dos ventos em energia elétrica

Conexão das pás hélices: As pás hélices (geralmente 3 pás) são conectadas nas naceles. As pás são responsáveis pela ativação do rotor (equipamento onde é gerada a energia mecânica de rotação).

Testes e verificações de tensão: para o início do funcionamento definitivo do parque são realizados testes e verificações de tensão para a produção de energia.

Figura 14 – Sítio escolhido para projeto parque eólico



Fonte: Layout de Parques Eólicos - CTRN (2012)

4.2.2 PARQUE EÓLICO EXPERIMENTAL

O parque eólico experimental é um laboratório que pode ser utilizado por fabricantes de aerogeradores para testar protótipos, novos componentes, algoritmos de controle, técnicas de manutenção e realizar monitoramento do funcionamento (longa duração) de protótipos em operação contínua. Serão preparadas cinco posições para aerogeradores de até 5 MW, com licenças e infraestrutura completa de um parque eólico comum, das quais três posições ficarão disponíveis para contratos com fabricantes de aerogeradores e duas posições serão ocupadas por aerogeradores adquiridos pelo Inter de dois fabricantes nacionais distintos que contenham os maiores índices de nacionalização. Os aerogeradores pertencentes ao Inter fazem parte da estratégia de obter experiência com a operação e manutenção de aerogeradores, além de propiciar meios para a realização de pesquisas próprias e, possivelmente, poder contribuir financeiramente com a venda de energia.

A infraestrutura do parque eólico experimental deverá conter:

- prédio térreo com 2.000 m² dividido em uma sala de supervisão e controle, três salas de trabalho – que permitem o isolamento das atividades de até três clientes diferentes –, seis escritórios para engenheiros e técnicos, almoxarifado, sala de manutenção de ferramentas e equipamentos, sala de reunião, espaço didático para recepção de visitantes, banheiros e vestiários;

- um pátio coberto, com aproximadamente 2.500 m², para receber equipamentos e peças grandes durante montagem/desmontagem de aerogeradores e serviços de manutenção;

- sistema elétrico de conexão à rede com ramais subterrâneos até as posições dos aerogeradores;

- obras civis em toda a área do parque eólico para preparar acessos e áreas de montagem dos aerogeradores, realizar proteção contra erosão do solo, instalação de cabos de comunicação;

- avaliação do solo nas posições dos aerogeradores para cálculo de fundações;

- duas torres anemométricas de referência com 120 m de altura;

- sistema Scada, computadores, sensores, registradores, ferramentas e instrumentos especiais de manutenção.

4.2.3 EXEMPLO – ANÁLISE DE VIABILIDADE DE UNIDADE DE GERAÇÃO EÓLICA

Esta seção objetiva analisar a viabilidade de um parque eólico, tomando como exemplo o projeto de parque eólico de Lagoa dos Patos, no Rio Grande do Sul. Este local apresenta condições eólicas favoráveis.

A complementaridade geográfica entre os potenciais eólico e hidráulico no Brasil de modo geral indica que as melhores áreas para aproveitamento eólico situam-se nas bordas do sistema de distribuição elétrico, distantes da geração hidrelétrica. Nessa situação, a inserção de energia eólica no sistema elétrico melhora seu desempenho, diminuindo linhas de transmissão e possibilitando um sistema melhor distribuído.

Sendo a maior laguna do Brasil e a segunda maior da América Latina, a Lagoa dos Patos situa-se no Estado do Rio Grande do Sul. Com seus 265 quilômetros de comprimento e superfície de 10.144 km², estende-se paralelamente ao Oceano Atlântico e é o alvo deste estudo. Ressalta-se que em 80% da área da Lagoa dos Patos as profundidades são inferiores a dois metros (FETTER FILHO, 1999). Sendo utilizada para navegação, irrigação, turismo, lazer e outras atividades, a conexão com o mar e sua grande dimensão faz da Lagoa dos Patos um recurso hídrico considerável. Por ser um local plano, as características para a propagação do vento são favoráveis, o que contribui para viabilização de investimentos eólicos neste local.



Fonte: **Potencial Eólico RS (2010)**

Segundo a Figura 16, identifica-se que as altitudes do relevo não ultrapassam os 100 metros, o que facilita a ocorrência de ventos com escoamento laminar. Visto que a superfície da água da Lagoa dos Patos não possui ondulações, podemos desconsiderar a influência negativa que a rugosidade do terreno ofereceria para este caso.

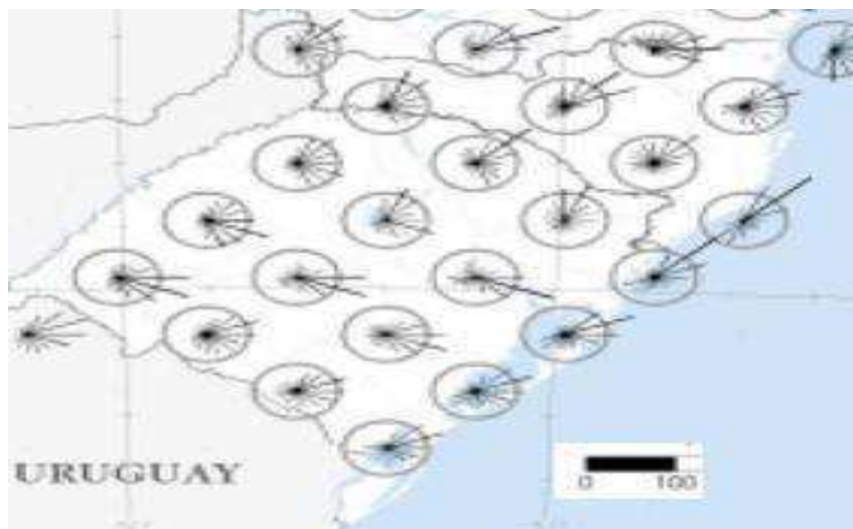
Figura 16 – Relevo região de possível parque eólico



Fonte: **Potencial Eólico RS (2010)**

A Figura 17 demonstra a média e direção predominante dos ventos é nordeste nos meses de setembro a maio. Entre junho e agosto não há uma direção predominante perfeitamente visível (AMARANTE, 2001).

Figura 17 – Direção dos ventos região parque eólico



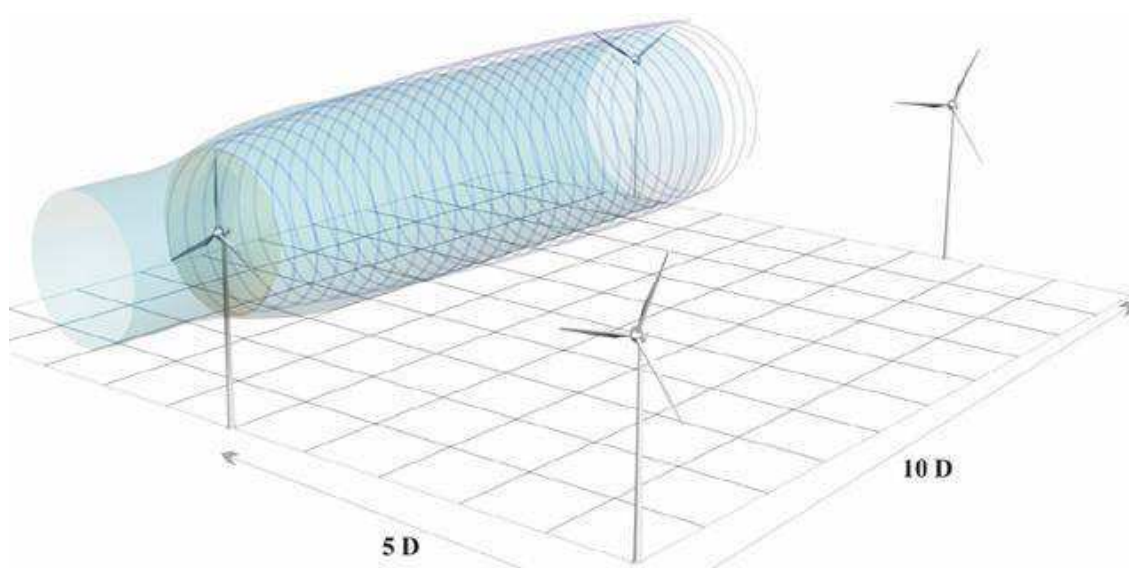
Fonte: Potencial Eólico RS (2010)

Para Amarante (2001), a absorção de energia cinética reduz a velocidade do vento a jusante do disco do rotor gradualmente e essa velocidade recupera-se ao misturar-se com as massas de ar predominantes do escoamento livre. Das forças de sustentação aerodinâmica nas pás do rotor resulta uma esteira helicoidal de vórtices, a qual também gradualmente dissipa-se. Após alguma distância a jusante da turbina, o escoamento praticamente recupera as condições de velocidade originais e turbinas adicionais podem ser instaladas, minimizando as perdas de desempenho causadas pela interferência da

turbina anterior. Na prática, essa distância varia com a velocidade do vento, as condições de operação da turbina, a rugosidade do terreno e a condição de estabilidade térmica vertical da atmosfera.

De modo geral, uma distância considerada segura para a instalação de novas turbinas é da ordem de 10 vezes o diâmetro “D”, se instalada a jusante, e 5 vezes “D”, se instalada ao lado, em relação ao vento predominante (Figura 18).

Figura 18 – Distância entre aerogeradores



Fonte: Potencial Eólico RS (2010)

Na realização da análise da viabilidade econômica foram calculados o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR), tomando como base a projeção do resultado e as simulações do fluxo de caixa constante. Uma taxa mínima de atratividade de 15% ao ano, calculada em função do custo de oportunidade, risco do empreendimento e liquidez do empreendimento foi considerada.

Concluindo, O relevo é favorável e a região estudada tem alto potencial de geração de energia elétrica a partir de ventos. Além disto, a região não tem rugosidade influente

na superfície da água, o fator de forma de Weibull é indicado como suficiente para uma ideal conversão de energia eólica em elétrica e tem proximidade de grandes centros de consumo, com baixos custos de transmissão, bem como proximidade a linhas de transmissão.

5 CONCLUSÃO

O processo de elaboração de layout/design de um parque eólico passa por várias etapas, das quais muitas eram desconhecidas pelo autor do trabalho. Etapas estas que atendem a uma série de exigências nos campos ambiental, econômico e social.

Após análise da pesquisa, pôde-se constatar que a engenharia econômica, bem como uma eficiente gestão de projetos e de pessoas são pilares fundamentais para uma otimização de um parque eólico em uma determinada região e seu bom funcionamento.

A atenção do estado, seja figura dos órgãos ambientais, seja como financiadores (em parte) e da iniciativa privada (como financiadores principais) é de inestimável importância para o desenvolvimento de centrais de energias renováveis, com uso ótimo da infraestrutura disposta.

A disposição otimizada de aerogeradores é o principal ponto no projeto de um parque eólico.

Para um bom projeto de parque eólico é fundamental uma longa série de medições de velocidade, direção e variabilidade do vento “in loco”.

BIBLIOGRAFIA

- Castro, R. M. (2003). *INTRODUÇÃO À ENERGIA EÓLICA, Energias Renováveis e Produção Descentralizada*. Lisboa : UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO DEEC / Secção de Energia.
- Khan, J., & Bhuyan, S. G. (march de 2009). OCEAN ENERGY: GLOBAL TECHNOLOGY DEVELOPMENT. *Ocean Energy Systems*. British Columbia, Canada.
- Soerensen, H. C., & Weinstein, A. (January de 2008). Ocean Energy: Position paper for IPCC. *European Ocean Energy Association*. Lübeck, Germany.
- ABNT. (2002). NBR 10520 - Informação e documentação - Citações em documentos - Apresentação. *Associação Brasileira de Normas Técnicas* (p. 7). ABNT.
- ABNT. (2002). NBR 6023 - Informação e documentação - Referências - Elaboração. *Associação Brasileira de Normas Técnicas* (p. 24). ABNT.
- ABNT. (2003). NBR 6028 - Informação e documentação - Resumo - Apresentação. (p. 2). Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT. (2005). NBR 6034 - Informação e documentação - Índice - Apresentação. *Associação Brasileira de Normas Técnicas* (p. 4). ABNT.
- ABNT. (30 de 12 de 2011). NBR 14724 - Informação e documentação — Trabalhos acadêmicos — Apresentação. *Associação Brasileira de Normas Técnicas* (p. 11). ABNT.
- ANEEL. (2005). *Atlas de Energia Elétrica*. Brasília : ANEEL.
- ANEEL. (2008). *Atlas de Energia Elétrica* (3ª ed., Vol. 1). Brasília: Aneel.
- Cortez, L. B., Lora, E. E., & Gómez, E. O. (2008). *Biomassa para Energia*. São Paulo: Unicamp.
- CRESESB/ CEPEL. (2008). *ENERGIA EÓLICA, PRINCÍPIOS E TECNOLOGIAS*. São Paulo:
- EPE. (2016). *BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL*. Rio de Janeiro.
- EPE. (2016). *Energia Renovável, Hidráulica, biomassa, Eólica, Solar, Oceanica*. Rio de Janeiro .
- Millais, C. (2005). *Wind Force 12: segurança global a partir do vento*. Rio de Janeiro: Revista Eco 21.
- Mit. (2015). *The Future of Solar Energy*. Cambridge: MITEL.
- Oliveira, W. S., Fernandes, A. J., & Pereira, E. T. (2014). TENDÊNCIAS DO PREÇO DA ELETRICIDADE NA INDÚSTRIA EÓLICA GLOBAL PARA 2050. *Revista Brasileira de Energia*, Vol 20, pp. 79-104.
- PRADO, Pedro Osvaldo. Projeto de um Parque Eólico com a Utilização de Sistema de Informação Geográfica. 2009. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia

Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009. Disponível em: .
Acesso em: 04 ago. 2017.

MENDES, Lígia; COSTA, Marta; PEDREIRA, Maria João. A Energia Eólica e o Ambiente: Guia de Orientação para a Avaliação Ambiental. Alfragide: Instituto do Ambiente, 2002. 66 p. Disponível em: . Acesso em: 25 mai. 2017.

REIS, Mônica M.; OLIVEIRA Jr., Demercil S.; CARVALHO, Paulo C. M. Estudo de Viabilidade Econômica de Geradores Eólicos de Pequeno Porte no Modo Autônomo. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2007.

GRUBB, Michael J; MEYER, Niels I. Wind Energy: Resources, Systems, And Regional Strategies. In: JOHANSSON, Thomas B. et al. Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity. Washington: Island Press, 1993. Cap. 3. p. 157-212.