

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

MARCOS RODRIGO SOUZA LOPES



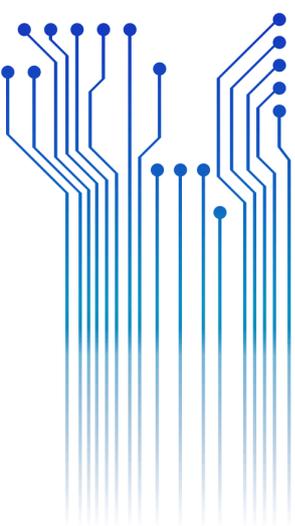
Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DE CASO DA VIABILIDADE ECONÔMICA NA
CONSTRUÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO EM PERNAMBUCO



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande

2018

MARCOS RODRIGO SOUZA LOPES

ESTUDO DE CASO DA VIABILIDADE ECONÔMICA NA
CONSTRUÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO EM PERNAMBUCO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Engenheiro
Eletricista.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M.Sc.

Campina Grande, Paraíba, março de 2018

MARCOS RODRIGO SOUZA LOPES

ESTUDO DE CASO DA VIABILIDADE ECONÔMICA NA
CONSTRUÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO EM PERNAMBUCO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Engenheiro
Eletricista.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

Professor Leimar de Oliveira, M.Sc.

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

A Deus, a Ele toda honra e toda glória, aos meus pais, que sempre me apoiaram e me deram todo suporte para a realização deste grande sonho, dedico.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pelo dom da vida e por estar sempre ao meu lado me iluminando e renovando minhas forças.

Agradeço aos meus pais, Marcos e Magda, por terem me dado a oportunidade e o suporte para cursar uma graduação em outra cidade, em especial a minha mãe por todo seu esforço e sempre solícita em todos os momentos.

Agradeço à minha noiva, Emilly Rocha, que sempre esteve ao meu lado compreendendo minhas ausências, e a toda sua família por sempre me acolher.

Agradeço aos meus amigos, futuros colegas de profissão, Djalma Segundo, Andson Freitas, Victor Licarião, João Victor, André Wild, e aos demais que fiz em Campina Grande, pelas descontrações e momentos de estudo, tornando o caminho mais fácil de seguir. Como também aos que ficaram na minha cidade, sempre torcendo e prontos para ajudar.

Agradeço ao professor Leimar de Oliveira, pela disponibilidade e paciência, assim como a orientação para execução deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos os funcionários da UFCG, amigos e parentes que de alguma forma contribuíram para realização desse sonho.

“Todas as coisas contribuem juntamente para o bem daqueles que amam a Deus.”

Romanos: 8.28.

RESUMO

As energias renováveis estão cada vez mais usadas no mundo. A energia eólica, em evidência nesse trabalho, em conjunto com investimentos em outras fontes pode conciliar as necessidades energéticas de uma sociedade, substituindo métodos que prejudicam o meio ambiente, como energias que utilizam combustíveis fósseis. Diante de tal relevância e amplas oportunidades no setor de energia eólica, o presente trabalho apresenta um estudo da viabilidade econômica na construção de um parque eólico no estado de Pernambuco, expondo os principais parâmetros utilizados com base em taxas de financiamentos e valores fornecidos pelos fabricantes. Inicialmente foi feita uma explanação geral acerca do mecanismo de formação dos ventos, fatores que influenciam o seu regime: rugosidade, altura, etc. Assim como a tecnologia usada nos aerogeradores e seus mecanismos de controle. Em seguida, evidencia-se o potencial eólico brasileiro, juntamente com a capacidade instalada e os aspectos relacionados a cada região. Por fim, é abordado o fator econômico na construção do parque eólico, avaliando os custos e a Taxa Interna de Retorno (TIR) do investimento realizado.

Palavras-chave: Energia Eólica; Potencial Eólico Brasileiro; Parque Eólico; Viabilidade Econômica.

ABSTRACT

Renewable energies are increasingly used in the world. Wind energy, in evidence in this work, together with investments from other sources can reconcile the energy needs of a society, replacing methods that harm the environment, such as fossil fuels. Faced with such relevance and ample opportunities in the wind energy sector, the present work presents a study of the economic viability in the construction of a wind farm in the state of Pernambuco, exposing the main parameters used based on rates of financing and values provided by the manufacturers. Initially a general explanation was made about the mechanism of formation of the winds, factors that influence its regime: roughness, height, etc. As well as the technology used in wind turbines and their control mechanisms. Next, the Brazilian wind potential, together with the installed capacity and the aspects related to each region, is evidenced. Finally, the economic factor in the construction of the wind farm is analyzed, evaluating the costs and the Internal Rate of Return (IRR) of the investment made.

Keywords: Wind Energy; Brazilian Wind Potential; Wind Farm; Economic Viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Formação dos Ventos devido ao deslocamento das massas de ar.	14
Figura 2: Série Temporal de velocidade do vento – Meses – Estação Petrolina - PE. ...	15
Figura 3: Curvas de potência ($P \times v$) típicas para turbinas com controle por estol e por passo.....	18
Figura 4: Perfil vertical da velocidade do vento. Comprimento da rugosidade (Z_0) é a altura onde $v=0$	19
Figura 5: Velocidade média em terrenos de diferentes rugosidades.	21
Figura 6: Fluxo do vento influenciado por obstáculos.	21
Figura 7: Efeito Esteira.....	22
Figura 8: Evolução da capacidade instalada.....	37
Figura 9: Fator de Capacidade.	37
Figura 10: Capacidade instalada e número de parques por estado.....	38
Figura 11: Potência Instalada (MW).	39
Figura 12: Matriz Energética brasileira.....	40
Figura 13: Crescimento mundial da capacidade instalada de Energia Eólica.	41
Figura 14: Os 10 maiores países em capacidade instalada.	41
Figura 15: Os 10 maiores países em capacidade instalada no ano de 2017.....	42
Figura 16: Emissões de CO2 evitadas em toneladas por mês.....	42
Figura 17: Maior parque eólico offshore do mundo – London Array – Inglaterra.	44
Figura 18: Rotor de eixo vertical – Rotor Darrieus.	23
Figura 19: Rotor de eixo horizontal.....	24
Figura 20: Curvas de potências de turbinas com controles distintos.	26
Figura 21: Componentes de um aerogerador típico de eixo horizontal.	28
Figura 22: Nacele de um aerogerador horizontal.....	29
Figura 23: Diagrama esquemático do aerogerador com gerador de indução duplamente alimentado.....	30
Figura 24: Torre eólica.	30
Figura 25: Exemplo de um transformador a seco.	31
Figura 26: Estrutura inicial de um painel elétrico presente em um parque eólico.	32
Figura 27: Exemplo de ligação entre dois painéis.	34
Figura 28: Estado de Pernambuco.....	47
Figura 29: Rugosidade no município de Araripina.....	48
Figura 30: Dia típico eólico e solar no Sertão do Araripe.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classe de rugosidade de acordo com a paisagem.	20
Tabela 2: Parques e potência por estados. Atualizado em 20/02/2018.	39
Tabela 3: Parâmetros iniciais do projeto.	52
Tabela 4: Despesas do projeto.	53
Tabela 5: Períodos do projeto.	53
Tabela 6: Parâmetros do financiamento.	54
Tabela 7: Impostos do projeto.	54
Tabela 8: Depreciação dos Equipamentos (valor presente).	55
Tabela 9: Depreciação dos custos pré-operacionais (valor presente).	55
Tabela 10: Financiamento do projeto utilizando o SAC.	56
Tabela 11: Financiamento do projeto utilizando o SAC (II).	57
Tabela 12: Remuneração do Capital Próprio.	58
Tabela 13: Demonstrativo de Resultado de Exercício – DRE (Valores em milhões de Reais).	59
Tabela 14: Fluxo de Caixa Descontado - FCD (Valores em milhões de Reais).	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEOLICA	Associação Brasileira de Energia Eólica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Elétrica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CCVE	Contrato de Compra e Venda de Energia
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CRESESB	Centro de Referências para Energias Solar e Eólica
CSLL	Contribuição Social sobre o Lucro Líquido
DRE	Demonstrativo de Resultado de Exercício
ELETROBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FC	Fator de Capacidade
FCD	Fluxo de Caixa Descontado
GWEC	Conselho Global de Energia Eólica
IPCA	Índices de Preços ao Consumidor Amplo
IR	Imposto de Renda
LER	Leilão de Energia Reserva
PIS/PASEP	Programa Integração Social
PROEOLICA	Programa Emergencial de Energia Eólica
PROINFA	Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia
RNA	Redes Neurais Artificiais
SAC	Sistema de Amortização Constante
TIR	Taxa Interna de Retorno

TJLP	Taxa de Juros de Longo Prazo
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
CO ₂	Dióxido de Carbono
C _p	Coefficiente de Potência
GW	Gigawatt
Km ²	Quilômetros quadrado
KW	Quilowatt (10 ³ Watt)
m	Metros
m ²	Metro quadrado
MW	Megawatt
m/s	Metros por segundo
MWh	Megawatt por hora
R\$	Real Brasileiro
S	Segundos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVOS	12
1.2. MOTIVAÇÃO	12
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2. ENERGIA EÓLICA – PRINCIPAIS CONCEITOS E PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS DE UM PARQUE EÓLICO	14
2.1. MECANISMO DE FORMAÇÃO DOS VENTOS	14
2.2. ENERGIA E POTÊNCIA EXTRAÍDA DO VENTO.....	17
2.3. FATORES QUE INFLUENCIAM O REGIME DOS VENTOS.....	19
2.4. AEROGERADORES	22
2.5. MECANISMO DE CONTROLE.....	24
2.6. PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM AEROGERADOR.....	28
2.7. ESTRUTURA DE PAINÉIS ELÉTRICOS PRESENTES NO PARQUE EÓLICO ..	32
3. ENERGIA EÓLICA – PANORAMA ATUAL	35
3.1. ENERGIA EÓLICA NO BRASIL.....	35
3.2. ENERGIA EÓLICA NO MUNDO.....	40
3.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA	43
3.4. CURIOSIDADE: PARQUE EÓLICO OFF-SHORE	44
3.5. ENERGIA EÓLICA OFF-SHORE NO BRASIL	45
4. PROJETO BÁSICO: ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA CONSTRUÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO EM PE.....	46
4.1. ASPECTOS CONSIDERADOS PARA O ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA.....	47
4.2. ANÁLISE DA REGIÃO ESCOLHIDA	48
4.3. ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA: MÉTODOS UTILIZADOS	50
4.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5. CONCLUSÕES.....	62
REFERÊNCIAS	63

1. INTRODUÇÃO

A Energia Elétrica tem papel fundamental em todos os lugares do mundo, e principalmente no Brasil. No século XIX, com a sua implantação, houve um significativo aumento na demanda de energia elétrica no mundo, com isso, têm-se intensificado e incentivado as buscas por fontes de energias alternativas. Em evidência a energia eólica, tem chamado bastante atenção, esta energia juntamente com outras fontes renováveis (Solar, Biomassa, Geotérmica, Maremotriz, etc.), com conscientes investimentos poderá haver uma conciliação entre as necessidades energéticas assim como o correto uso do meio ambiente.

A energia eólica como foco do presente trabalho, diz respeito a energia cinética existentes nas massas de ar em constante movimento. A geração eólica-elétrica ocorre através do contato do vento com as pás da turbina, ao girar, a energia cinética é convertida em energia mecânica, que aciona o rotor do aerogerador, produzindo assim energia elétrica. Ao observar a aplicação da energia eólica em trabalhos mecânicos, remonta-se a origem da utilização dessa fonte de energia pela humanidade, a qual passou a ser considerada uma alternativa para geração de energia elétrica, a partir da crise do petróleo, década de 70.

Contudo, é importante destacar que a contratação de grandes montantes de energia eólica, requer determinados custos, sabe-se que o custo das turbinas eólicas é muito alto, dependendo da tecnologia utilizada, ou seja, uma única turbina de 1,8MW tem o valor de até US\$ 2000.000,00. O custo da instalação é determinado pela capacidade instalada, mas, por ser um processo que requer a presença de diversas áreas de estudo, como civil, mecânica, entre outros, existem também outros custos que devem ser avaliados no planejamento do projeto, tais como:

Construção ou reforço da infraestrutura de transmissão ou de distribuição de energia elétrica;

Construção de obras civis na região, como a terraplenagem, para que os longos caminhos, que transportam os elementos dos aerogeradores, sejam capazes de transitar pelo canteiro sem sofrer danos por flexões excessivas nos eixos.

A etapa inicial para instalação de um parque eólico é a definição da área de instalação e o potencial eólico no determinado local.

Após determinada análise é feita uma medição dos ventos por um período de um ano, além da velocidade, é importante que eles sejam regulares, assim como layouts da usina, tipos de máquinas, fabricantes das torres, altura das torres, previsão de geração anual de energia e capacidade máxima gerada. Por fim, apesar de existir um enorme potencial eólico a ser explorado é importante o estudo ambiental e socioeconômico, para que sejam evitados equívocos que causem a inviabilização do projeto.

1.1. OBJETIVOS

Esse trabalho de conclusão de curso tem como foco, analisar a viabilidade econômica da construção de um parque eólico no estado de Pernambuco. Para atingir esse objetivo, foi feito o embasamento teórico dos principais conceitos básicos, e também uma análise no atlas eólico de PE, para definir a cidade mais propícia a receber o parque. Após a definição do local a ser instalado o parque eólico, juntamente com os desafios encontrados, como a regularidade e velocidades dos ventos sobre determinadas alturas, rugosidade e altitude. Serão avaliados os custos e a taxa interna de retorno (TIR), para saber se o presente investimento é viável, a fim de se obter uma otimização de todo o processo de geração de energia elétrica através do vento.

1.2. MOTIVAÇÃO

O Brasil encerrou o ano de 2017 com 12,76 GW de capacidade instalada de energia eólica, em 508 parques eólicos. Em construção e contratados, há mais 5,11 GW em outros 223 parques. Os dados fazem parte do último boletim divulgado pela Associação Brasileira de Energia Eólica (Abeeólica), demonstrando grande crescimento dessa indústria, com perspectivas de atingir cerca de 27 GW de potência instalada em 2023. Por esses dados e sabendo que o país tem um potencial eólico estimado, superior a 500 GW (ABEEOLICA, 2018), foi de grande importância analisar e avaliar os mecanismos utilizados para elaboração de um projeto, juntamente com todos os custos dos determinados fatores envolvidos.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta a seguinte distribuição.

O Capítulo 1 é introdutório, faz uma breve contextualização do trabalho, apresenta sua motivação, define os objetivos e a forma como os capítulos estão dispostos.

O Capítulo 2 é uma breve revisão bibliográfica na qual revisa os conceitos básicos da energia eólica, assim como seu funcionamento e os principais equipamentos presentes, juntamente com os critérios envolvidos na alocação das turbinas.

O Capítulo 3 tem como principal enfoque a abordagem do atual potencial eólico brasileiro, e do mundo, apresentar as vantagens e desvantagens da energia eólica e suas curiosidades.

O Capítulo 4 será avaliado os passos para elaboração de um projeto básico, e também os custos e a viabilidade econômica da construção de um parque eólico no estado de Pernambuco.

O Capítulo 5 é conclusivo e destaca as partes mais importantes após a realização desse trabalho.

2. ENERGIA EÓLICA – PRINCIPAIS CONCEITOS E PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS DE UM PARQUE EÓLICO

2.1. MECANISMO DE FORMAÇÃO DOS VENTOS

A energia eólica pode ser considerada como uma das formas em que aparece a energia proveniente do sol, já que os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera. Esse tipo de aquecimento desigual pode ser atribuído aos movimentos da terra e à orientação dos raios solares.

As regiões tropicais que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Consequentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos (CRESESB,2009).

Figura 1: Formação dos Ventos devido ao deslocamento das massas de ar.



Fonte: Atlas Eólico do Brasil, 1998.

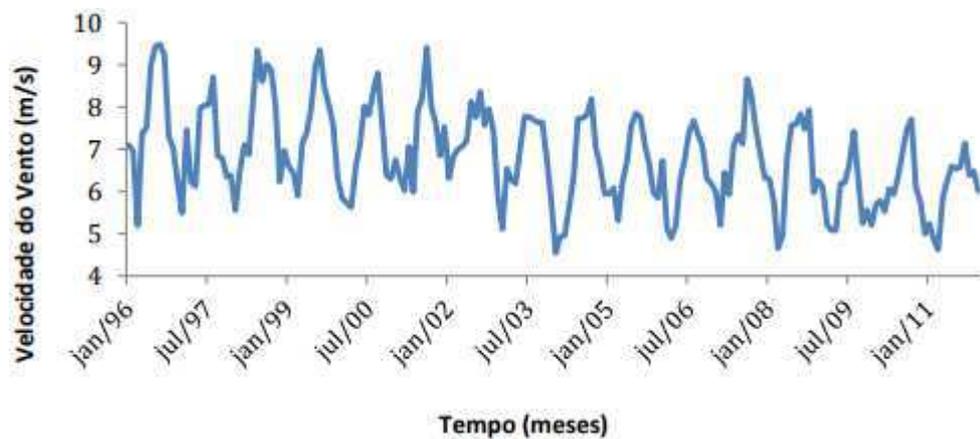
Existem locais no globo terrestre nos quais os ventos não param de “soprar”, pois os mecanismos que os produzem (aquecimento no equador e resfriamento nos pólos) estão sempre presentes na natureza e podem ser classificados em:

- Alísios: Ventos que sopram dos trópicos para o equador, em baixas altitudes.
- Contra-Alísios: Ventos que sopram do equador para os pólos, em altas altitudes.
- Vento do Oeste: Ventos que sopram dos trópicos para os pólos.
- Polares: Ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.

Saber o comportamento do vento e tentar ter o controle não é importante apenas para que seja possível estimar a devida geração de um parque eólico, juntamente com o seu rendimento. Mas, é fundamental para o aperfeiçoamento das turbinas de acordo com o local onde serão colocado os aerogeradores, tendo em vista um maior aproveitamento possível da energia contida no vento.

Diante dessa importância uma extensa coleta de dados sobre a velocidade do vento em determinada região é primordial, para que sejam criadas as chamadas “Séries Temporais” (conjunto de observações realizadas em momentos diferentes de tempo, estando sujeitas a variações aleatórias), como pode ser visto na Figura 1.

Figura 2: Série Temporal de velocidade do vento – Meses – Estação Petrolina - PE.



Fonte: Maxwell (2013).

O vento apresenta variações no decorrer do tempo que podem ser de rápida duração, diárias, sazonais e anuais e o conhecimento delas são essenciais. As variações diárias e sazonais são importantes para uma estimativa do suprimento da demanda do sistema elétrico.

Como exemplo, sabendo-se que na maioria das vezes a velocidade do vento é maior durante o dia que durante a noite, se o pico de carga do sistema ocorrer durante o dia, ele pode ser suprido tanto pelas usinas convencionais, desempenhando o papel de geração base, quanto pelas usinas eólicas existentes, desempenhando o papel de geração de ponta. Por outro lado, se os ventos não são tão fortes durante o dia, a implantação de uma usina eólica neste sistema não seria interessante.

A variação anual de velocidade do vento também é importante para estudos de viabilidade de implantação de usinas eólicas porque fornece um conhecimento do regime local dos ventos, embora a variação encontrada neste caso seja bem menor do que a variação sazonal (OLIVEIRA, 2014).

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 50m 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 100m 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. Porém, o órgão ambiental precisa ser informado na instalação, acompanhado do memorial descritivo sucinto, com as coordenadas do local em planta com levantamento planialtimétrico (planta com o maior número possível de informações de estudo), indicando, quando couber, a que empreendimento se refere (STAUT, 2011).

A dependência da geração eólica das condições atmosféricas torna essa fonte de energia extremamente vulnerável, já que não é possível saber de certeza se haverá ventos fortes ou não, deixando a dúvida sobre o funcionamento do parque eólico. Visando solucionar esse problema, alguns programas de aproximação de valores têm sido desenvolvidos, tais como: Redes Neurais Artificiais (RNA) e Lógica Nebulosa (Lógica “Fuzzy”). Além do comportamento estocástico do vento é importante observar as curvas de potências do desempenho dos aerogeradores, que vai ser evidenciada no próximo tópico na Figura 3.

2.2. ENERGIA E POTÊNCIA EXTRAÍDA DO VENTO

Como foi abordado no tópico anterior, é primordial e fundamental uma longa análise na região de implantação de um parque eólico a fim de se obter um retorno aceitável, após estudos das condições do vento.

Dispondo da velocidade do vento no instante considerado, é possível calcular a energia disponível no vento.

$$E = \frac{mv^2}{2};$$

Onde:

E = Energia Cinética;

v = Velocidade do vento no instante considerado;

m = massa do ar;

A partir da relação mostrada acima, calcula-se a potência máxima disponível.

$$P_{disp} = \frac{1}{2}\rho Av^3;$$

Onde:

P_{disp} = Potência disponível no vento [W];

ρ = massa específica do ar [kg/m³];

A = Área da seção transversal ($\pi D^2/4$), em que D é o diâmetro do rotor [m²];

v = velocidade do vento [m/s].

Porém, sabe-se que nem toda potência disponível no vento poderá ser extraída pelo aerogerador, devido às características operativas da turbina (limitações do sistema mecânico). Diante dessas limitações é calculado um fator chamado de coeficiente de aproveitamento aerodinâmico ou coeficiente de potência (C_p).

$$C_p = \frac{P_{mec}}{P_{disp}};$$

Ao associar as duas equações obtidas acima, têm-se a seguinte relação da potência da turbina eólica:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3;$$

Onde:

P = Potência da turbina eólica [W];

C_p = Coeficiente de aproveitamento aerodinâmico;

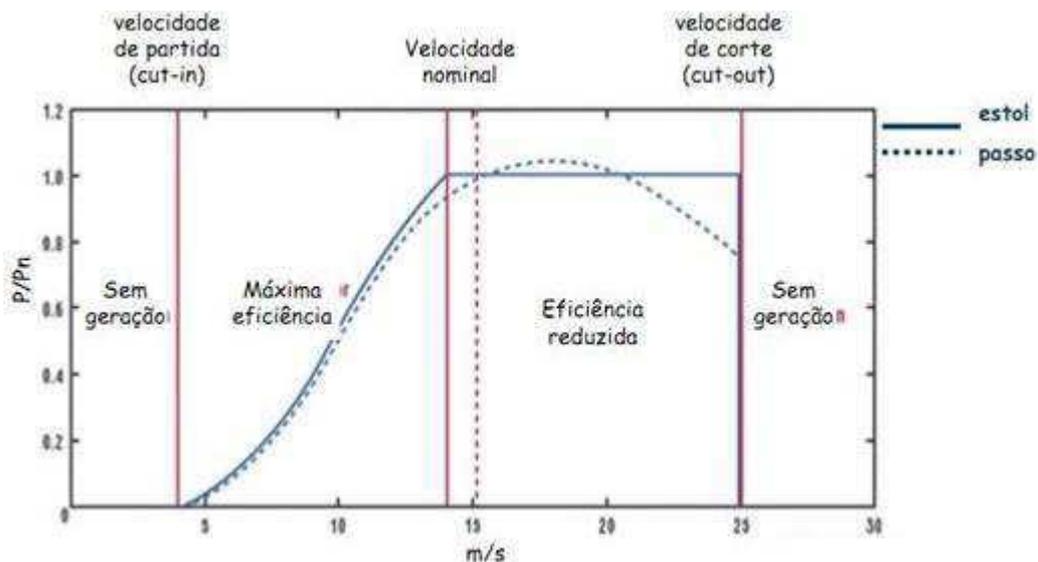
ρ = massa específica do ar [kg/m³];

A = Área da seção transversal ($\pi D^2/4$), em que D é o diâmetro do rotor [m²];

v = velocidade cinética do vento [m/s].

A curva que relaciona o coeficiente de aproveitamento aerodinâmico de acordo com a velocidade do vento pode ser vista abaixo e é chamada “curva de rendimento”.

Figura 3: Curvas de potência ($P \times v$) típicas para turbinas com controle por estol e por passo.



Fonte: Shenck, 2003.

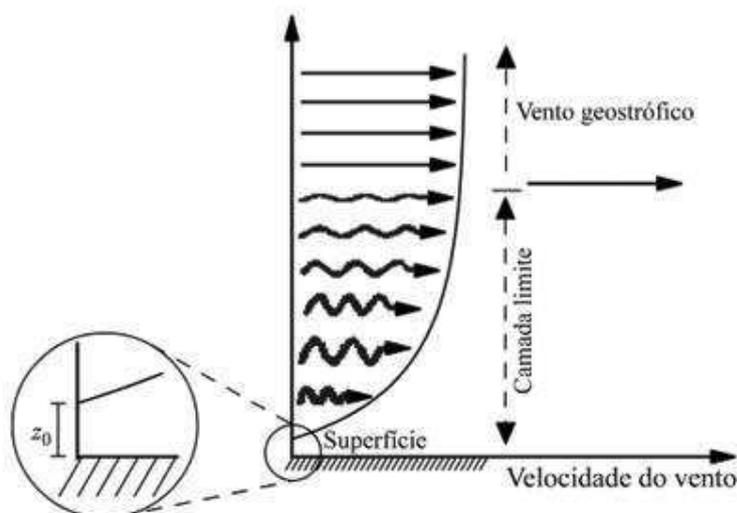
2.3. FATORES QUE INFLUENCIAM O REGIME DOS VENTOS.

O comportamento estatístico do vento ao longo do dia é um fator que é influenciado pela sua variação de velocidade ao longo do tempo. As características topográficas de uma região também influenciam o comportamento dos ventos, visto que, em uma determinada área pode ocorrer diversas variações na velocidade, ocasionando aceleração ou frenagem na sua velocidade. Além das variações topográficas e de rugosidade do solo, a velocidade também varia de acordo com a altura.

Por essa razão, os procedimentos para analisar o local no qual se deseja instalar aerogeradores, devem levar em consideração todos os parâmetros regionais que influenciam nas condições do vento. Entre os principais fatores que influenciam no regime dos ventos destacam-se:

Altura: A velocidade do vento varia conforme a altura, em função da rugosidade do terreno. Portanto, a velocidade do vento próxima a superfície é quase zero, e aumenta gradativamente. Assim como nos demais fluídos, a partir de certa altura ela se torna praticamente constante (MAXWELL, 2007).

Figura 4: Perfil vertical da velocidade do vento. Comprimento da rugosidade (Z_0) é a altura onde $v=0$.



Fonte: Martins, Guarnieri e Pereira (2008).

Rugosidade: O perfil de velocidades é afetado pelos tipos de vegetação circundante, rochas, etc. Qualquer irregularidade na cobertura do solo tende a aumentar a fricção com o ar e por isso reduzir a sua velocidade. O fato da classe de rugosidade ser menor em superfícies marítimas tem motivado projetos de parques eólicos *off-shore* (SALVADOR, 2012).

A Tabela abaixo irá mostrar a classe de rugosidade dos terrenos de acordo com a paisagem.

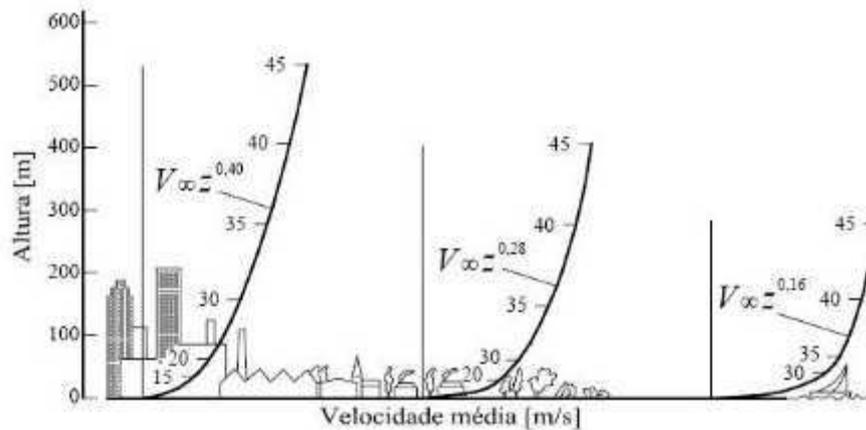
Tabela 1: Classe de rugosidade de acordo com a paisagem.

Classe de Rugosidade	Comprimento de Rugosidade (m)	Descrição da Paisagem
0	0,0002	Superfície do mar
0,5	0,0024	Terreno com a superfície plana, aberto: aeroporto, grama corta, etc.
1,0	0,03	Área agrícola aberta, sem fendas e cercas e construções dispersas.
1,5	0,055	Área agrícola com algumas casas e cercas com até 8m de altura, com uma distância de até 1250m.
2,0	0,1	Área agrícola com algumas casas e cercas com até 8m de altura, com uma distância de até 500m.
2,5	0,2	Área agrícola com muitas casas, plantas e arbustos, ou cercas de até 8m de altura, com distância de até 800m.
3,0	0,4	Vilas, cidades pequenas, áreas agrícolas com cercas altas, florestas e terrenos irregulares e com rugosidade.
3,5	0,8	Grandes cidades com edifícios altos.
4,0	1,6	Cidades muito grandes com edifícios altos e arranhacéus.

Fonte: OLIVEIRA (2014).

Também é possível observar através da Figura 5, a variação da velocidade do vento de acordo com a classe de rugosidade e altura.

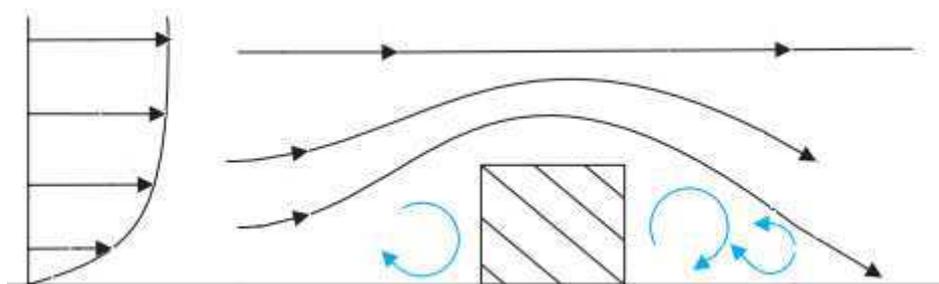
Figura 5: Velocidade média em terrenos de diferentes rugosidades.



Fonte: LOREDO-SOUZA (2006).

Obstáculos: Os obstáculos impedem a passagem das partículas de ar e alteram o seu perfil de velocidade. Normalmente quando se quer fazer um estudo quantitativo do desenvolvimento do escoamento influenciado por obstáculos, como: rochas de grande volume, conjunto de árvores altas ou construções civis, é habitual serem considerados blocos paralelepípedicos (JERVELL, 2008). Assim como será mostrado na Figura abaixo:

Figura 6: Fluxo do vento influenciado por obstáculos.



Fonte: JERVELL (2008).

Efeito Esteira: O vento que abandona a turbina tem um conteúdo energético inferior, criando um “abrigo” na direção a favor do vento. Além disso, o fluxo real atrás da turbina tem na verdade uma velocidade angular oposta a velocidade angular do rotor, isto é, o fluxo é ligeiramente rotacional e não unidimensional, fazendo com que haja perdas de aerodinâmica. Nos parques eólicos, a forma de evitar a turbulência ao redor das turbinas é estabelecer certas distâncias mínimas entre elas.

Figura 7: Efeito Esteira.



Fonte: Energias Renováveis – Luís Timóteo, 2014.

2.4. AEROGERADORES

Um aerogerador (turbina eólica ou sistema de geração eólica) é um equipamento que utiliza a energia cinética do vento, convertendo-a em energia elétrica.

O aerogerador conta com um rotor com rolamento que, em funcionamento com todo o sistema de medição (anemômetro) e pás giratórias, gera uma força mecânica. Com isso, a energia eólica é transmitida das pás ao rolamento que por sua vez, é ligado diretamente a um multiplicador que aumenta imediatamente a velocidade do eixo do aerogerador. A movimentação do eixo gera energia mecânica, que é retransmitida até um gerador elétrico já conectado. A energia sai do aerogerador já em formato de eletricidade, indo direto para a rede elétrica (TECNOGERA, 2015).

Hoje o Brasil possui dois modelos de aerogeradores: Rotores de eixo vertical e rotores de eixo horizontal.

Rotores de Eixo Vertical: São geralmente mais caros que os de eixo horizontal, têm a vantagem de não necessitarem de mecanismos de acompanhamentos para variações da direção do vento, o que reduz a complexidade do projeto. Também podem ser movidos por forças de sustentação e por forças de arrasto. Os principais rotores de eixo vertical são Darrieus e Savonius (CRESESB, 2008).

Figura 8: Rotor de eixo vertical – Rotor Darrieus.



Fonte: PORTAL-ENERGIA (2016).

Rotores de Eixo Horizontal: São os mais comuns, e grande parte da experiência é voltado para sua utilização. São movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação e forças de arrasto. Os rotores que giram predominantemente sob o efeito de forças de sustentação permitem liberar muito mais potência do que aqueles que giram sob o efeito de forças de arrasto, para uma mesma velocidade do vento.

Tais rotores podem ser constituídos de uma pá e contrapeso, duas pás três pás ou múltiplas pás. Em geral, utilizam-se pás rígidas de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada (CRESESB, 2008).

Figura 9: Rotor de eixo horizontal.



Fonte: MARCUCCI (2017).

Os rotores mais utilizados para geração de energia elétrica são os de eixo horizontal do tipo hélice, normalmente composto de 3 pás ou em alguns casos de 1 ou 2 pás (esses com velocidades médias muito altas e possibilidade de geração de maior ruído acústico).

Também podem ser classificados quanto a sua potência: Pequenos <500KW, Médios entre 500 e 1000KW, Grandes >1MW.

2.5. MECANISMO DE CONTROLE

Os mecanismos de controle são relacionados à orientação do rotor, ao controle de velocidade, ao controle de carga, etc. Pela variedade de controles, existe uma enorme variedade de mecanismos que podem ser mecânicos (velocidade, passo, freio), aerodinâmicos (posicionamento do rotor) ou eletrônicos (controle da carga) (CRESESB,2008).

Os modernos aerogeradores utilizam dois diferentes princípios de controle aerodinâmico para limitar a extração de potência, à potência nominal do aerogerador. Esses controles são chamados de controle estol (*stall*) e controle de passo (*pitch*).

O controle *stall* foi durante muito tempo o mais utilizado, no entanto, por apresentar maior flexibilidade na operação e melhor desempenho, o controle de passo tem sido adotado com mais frequência (BRITO, 2008).

Controle do tipo Passo (*Pitch*): É um sistema dito ativo, que normalmente necessita de uma informação vinda do sistema de controle, que será mais detalhado no decorrer desse tópico. De certa forma que sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido à um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno do seu eixo longitudinal; ou seja, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque. Esta redução do ângulo diminui as forças aerodinâmicas e permite que a potência gerada pela turbina seja constante no valor nominal projetado.

Aerogeradores com controle de passo são mais sofisticados e eficientes, do que os controlados por estol e apresentam as seguintes vantagens:

I: Controle de potência ativa sob todas as condições de vento;

II: Alcançam a potência nominal mesmo sob condições de baixa massa específico do ar;

III: Maior produção de energia sob as mesmas condições;

IV: Não é necessária a utilização de fortes freios para paradas de emergência;

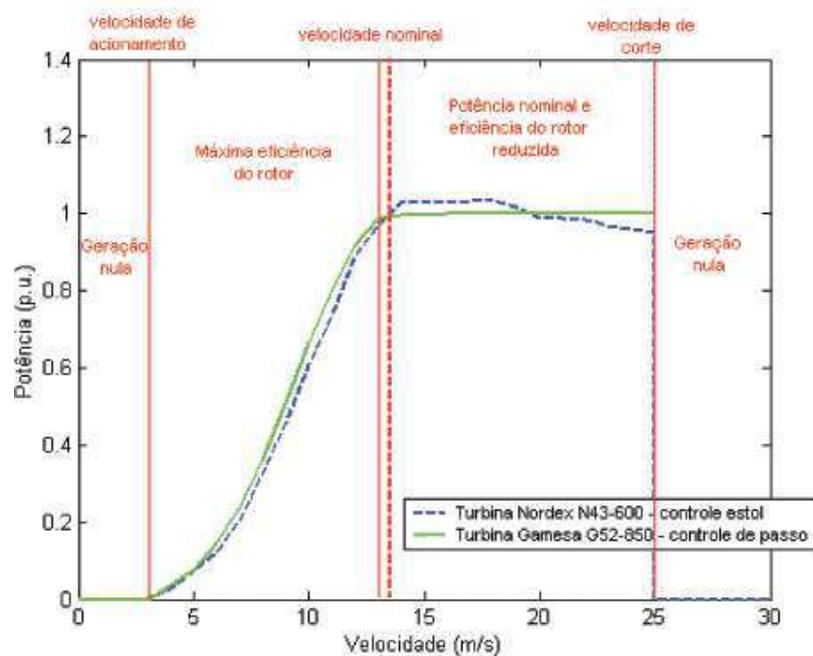
V: Partida simples do rotor pela mudança de passo (OLIVEIRA, 2010).

Controle do tipo estol (*stall*): É um sistema “passivo”, pois reage a velocidade do vento. O ângulo de passo é escolhido no projeto do aerogerador, de tal forma que quando a velocidade do vento ultrapassa a velocidade nominal, as forças de arrasto aumentam e as de sustentação diminuem através do chamado “deslocamento aerodinâmico do vento”. Tais forças agirão para impedir o aumento da potência do rotor. Para evitar que o efeito *stall* ocorra em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, o que reduziria drasticamente a potência do rotor, as pás possuem uma pequena tração longitudinal (CRESESB, 2008).

Quando comparado ao controle de passo apresenta as seguintes vantagens:

- I: Estrutura de cubo do rotor simples;
- II: Menor manutenção devido a um número menor de peças móveis;
- III: Auto-Confabilidade do controle de potência.

Figura 10: Curvas de potências de turbinas com controles distintos.



Fonte: Modelagem de usinas eólicas para estudos de confiabilidade - LEITE; FALCÃO; BORGES (2006).

De modo geral, o controlador do aerogerador tem três funções: Sistema de segurança (*safety system*), controle de supervisão (*supervisory Control*) e o controle de malha fechada (*closed-loop control*) (COSTA, 2010).

O sistema de segurança (*safety system*) pode ser ativado pelas seguintes razões:

- Excesso de velocidade do rotor;
- Alguma informação vinda do sensor de vibração, que pode significar a ocorrência de uma importante falha estrutural;
- Informação proveniente de um temporizador que reinicializa a cada iteração do controlador. Caso a reinicialização não seja feita, significa que o controlador está com defeito e o sistema de segurança deve desligar o aerogerador.

O controlador de supervisão (*supervisory controller*) verifica se cada etapa é concluída com êxito antes de prosseguir para a próxima, ou seja, passa de um estado operacional do aerogerador, para outro. Apresenta os seguintes estados operacionais:

- Stand-by: O aerogerador está disponível para entrar em funcionamento, com as condições favoráveis;
- Start-up: Parte de arranque do aerogerador para produção de energia.
- Em produção de energia.
- Aerogerador parado com erro.

O controle de malha fechada (*closed-loop control*) consiste num sistema que ajusta automaticamente o estado operacional do aerogerador, a fim de manter predefinidas as características e o regime de funcionamento, tem como exemplos:

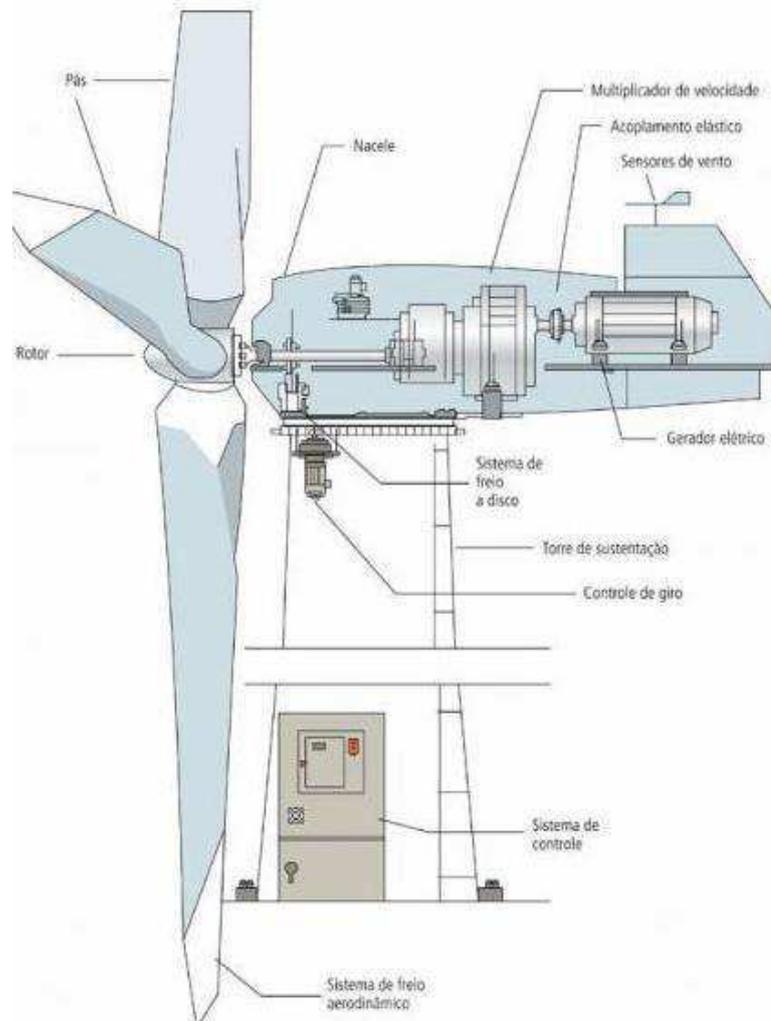
- Controle de passo da pá, a fim de regular a potência de saída do aerogerador para ventos superiores ao nominal; e também regular o arranque e a frenagem (COSTA, 2010).

Na Alemanha cerca de 50% de todos os aerogeradores instalados são do tipo controle de passo, porque dois dos maiores fabricantes preferem este tipo de controle de aerogeradores.

2.6. PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM AEROGERADOR

Será explicado com mais detalhes alguns dos principais componentes de um aerogerador típico, como pode ser visto na figura abaixo.

Figura 11: Componentes de um aerogerador típico de eixo horizontal.



Fonte: evolucaoenergiaeolica.wordpress.com

Nacela: É a carcaça montada sobre a torre onde se localizam diversos equipamentos, tais como: gerador, caixa de engrenagens (quando utilizada), sistema de controle e medição do vento, motores para o melhor posicionamento em relação ao vento, entre outros.

Figura 12: Nacele de um aerogerador horizontal.



Fonte: CRESESB (2008)

Pás, cubos e eixos: São componentes oco feito de materiais como fibra de carbono ou vidro, tem a função de captar o vento, e converter sua potência ao centro do rotor. São dispostas em outra estrutura denominada cubo, em seguida tem o eixo que é o responsável pelo acoplamento do cubo ao gerador.

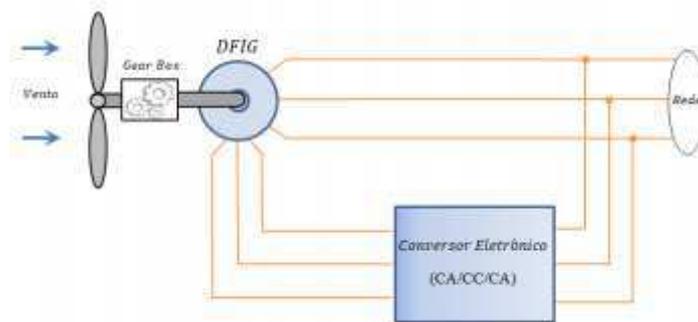
Transmissão e caixa multiplicadora: Tem o objetivo de transmitir energia mecânica até o gerador, que é entregue pelo eixo do rotor. É composta por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos. O projeto tradicional de uma turbina eólica consiste em colocar a caixa de transmissão mecânica entre o rotor e o gerador, de forma a adaptar a baixa velocidade do rotor à velocidade de rotação mais elevada dos geradores convencionais.

Gerador: Responsável por transformar a energia mecânica rotacional em elétrica. Atualmente existem quatro tipos básicos de geradores utilizados para aplicação em geração de energia eólica: Gerador síncrono a ímãs permanentes, Gerador síncrono com rotor excitado, Gerador de indução em gaiola e Gerador de indução duplamente excitado. Cada um desses geradores apresenta vantagens e desvantagens e devem ser analisados com cuidado diante da sua incorporação ao sistema (SANTOS, 2015).

Com mais detalhe será analisada a topologia “Gerador Assíncrono duplamente alimentado”, é a melhor configuração a ser utilizada em uma central eólica moderna, econômica e de grande porte (OLIVEIRA, 2010).

Gerador de Indução Duplamente Alimentado: O estator da máquina é conectado diretamente a rede de energia e o circuito do rotor é alimentado por um conversor estático bidirecional na topologia *back-to-back* que regula a frequência de excitação do rotor.

Figura 13: Diagrama esquemático do aerogerador com gerador de indução duplamente alimentado.



Fonte: SANTOS (2015)

Os pontos negativos: Necessidade de uma caixa de transmissão mecânica, e os distúrbios da rede elétrica são diretamente transmitidos ao gerador.

Torre: Elemento que tem a função de sustentar o rotor e a nacela na altura apropriada ao seu funcionamento. Essas torres chegam a atingir 100 metros e podem pesar mais de 800 toneladas.

Figura 14: Torre eólica.



Fonte: BELFORT (2010).

Na base de cada torre do aerogerador, se faz necessário a instalação de transformadores de potência “secos”, com o objetivo de elevar a tensão para se trabalhar com correntes menores, e posteriormente cabos mais finos.

Transformadores a seco são selecionados devido aos seguintes fatores:

- 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, não libera gases tóxicos;
- Custos de manutenção e instalação minimizados: Construção simples, dispensando paredes 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 a seco com o dobro da potência) (WEG, 2018).
-

Figura 15: Exemplo de um transformador a seco.



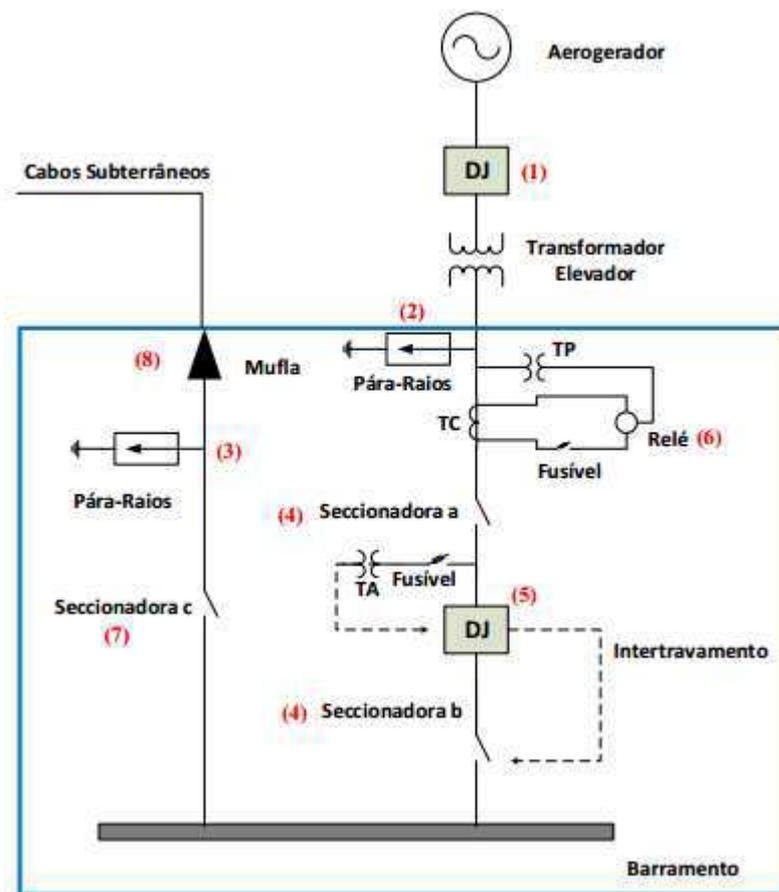
Fonte: WEG (2018).

2.7. ESTRUTURA DE PAINÉIS ELÉTRICOS PRESENTES NO PARQUE EÓLICO

Painéis elétricos são invólucros devidamente protegidos e são conhecidos por abrigar uma combinação de equipamentos responsáveis por várias funções como: manobra, controle, medição, sinalização, proteção e regulação.

A seguir será mostrada a estrutura inicial do painel elétrico usado em um parque eólico, onde serão descritas todas as características dos equipamentos presentes nesse painel.

Figura 16: Estrutura inicial de um painel elétrico presente em um parque eólico.



Fonte: Projeto básico de um parque eólico - Oliveira (2010).

(1) Disjuntor na saída de cada aerogerador: Esse equipamento é de responsabilidade do fabricante do aerogerador, com as seguintes funções:

- Proteção do aerogerador em caso de alguma falta no trecho em que o disjuntor está presente.

- Dispositivo de retaguarda contra uma possível não atuação do dispositivo de proteção.

(2) Para-raios na saída de cada aerogerador: Tem a função de prevenir o sistema contra possíveis sobretensões decorrentes do chaveamento da seccionadora e do disjuntor presente no painel. Apesar de protegerem contra as sobretensões advindas das descargas atmosféricas que possam atingir o aerogerador ou a torre de sustentação, destaca-se também a estrutura metálica da torre por apresentar essa blindagem.

(3) Para-raios na saída/entrada de cada painel: Tem a função de proteger todo o painel contra possíveis sobretensões decorrentes de descargas atmosféricas no terreno do parque eólico.

(4) Chaves seccionadoras “a” e “b”: É questionável a presença da chave “a”, já que a “b” poderia isolar o sistema em caso de falta ou necessidade de manutenção de algum equipamento, se considerado que para tal ação o aerogerador é primeiramente desligado.

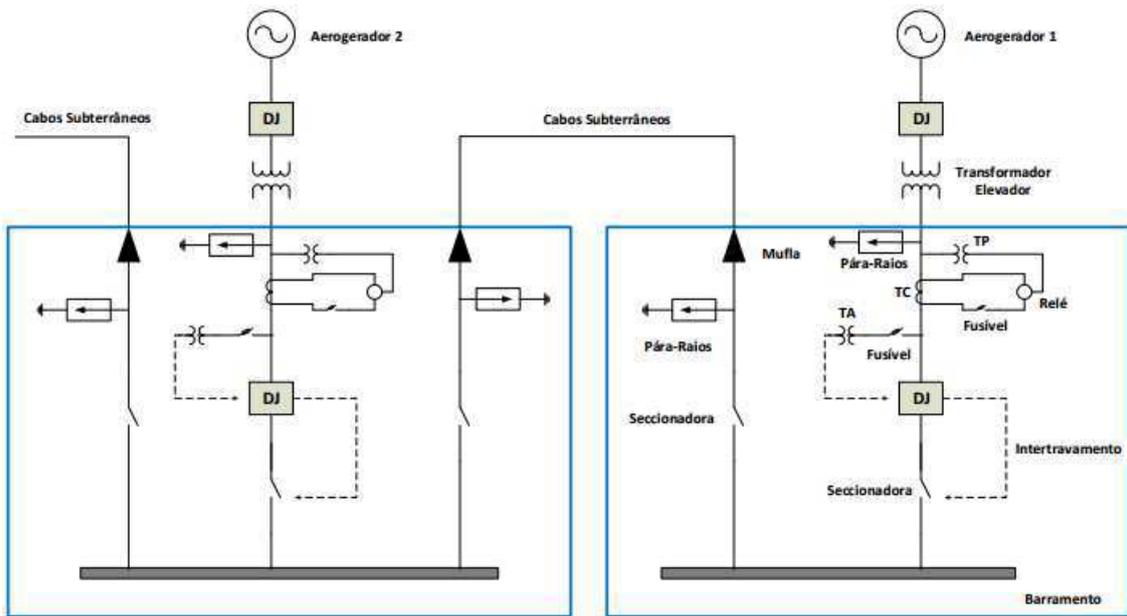
(5) Disjuntor presente no painel: Disjuntor de média tensão que utiliza o gás (SF6) para extinção do arco elétrico e como meio isolante. Está associado a um conjunto de dispositivos (TC, TP e relés de proteção), responsáveis tanto para a detecção do curto quanto para acionar as molas de abertura. Pode ser comandado remotamente e possui intertravamento com a chave seccionadora “b”. De modo que ela não atue quando o circuito tiver energizado.

(6) Transformadores de correntes e potencial associados a relés de proteção: Os transformadores de corrente e de potencial possuem como finalidades principais a isolação dos equipamentos de medição, controle e relés do circuito de alta tensão. Os relés de proteção têm a função de detectar alguma anomalia e promover o acionamento dos equipamentos de sinalização e proteção como alarmes e disjuntores.

(7) Chave seccionadora “c”: Chave de comando manual para abertura e fechamento sem carga. Sua presença aumenta a confiabilidade do sistema já que trás uma maior vantagem operativa, em caso de defeitos de trecos com cabos enterrados.

(8) Mufla: Terminação de cabos onde existe a mudança de tipo de isolamento. Tem a função de fazer a impermeabilização no ponto de término do isolamento.

Figura 17: Exemplo de ligação entre dois painéis.



Fonte: Projeto básico de um parque eólico - Oliveira (2010).

Cabos Subterrâneos: Na maioria dos projetos de parques eólicos, os aerogeradores são distribuídos por uma extensa área buscando maximizar o rendimento do empreendimento. Devido à grande quantidade de cabos para concretização do projeto, deve ser de extrema importância a escolha dos mesmos, já que estes costumam elevar bastante o custo total do projeto.

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. A grande maioria dos empreendimentos de geração eólica adota o tipo de instalação com cabos subterrâneos, que se comparada às redes aéreas, possui maior confiabilidade já que os condutores estão menos susceptíveis a fenômenos da natureza (ventos, raios, entre outros) e a ação humana. No entanto, esse tipo de instalação apresenta uma maior dificuldade de detecção de falhas nos condutores. O fato dos cabos ocuparem uma área muito grande no parque eólico inviabiliza economicamente a possibilidade destes serem instalados em canaletas ou bandejas.

3. ENERGIA EÓLICA – PANORAMA ATUAL

3.1. ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

A energia eólica no Brasil teve seu início em 1992, onde foi instalado o primeiro aerogerador no país, que foi resultado de uma parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), através do financiamento do instituto de pesquisas dinamarquês *Folkecenter*. Essa turbina eólica, de 225 km, foi a primeira a entrar em operação comercial na América do Sul, em 1992, localizada no arquipélago de Fernando de Noronha (Pernambuco).

No decorrer dos dez anos seguintes, quase não houve avanço no setor de energia eólica no país, principalmente pelo alto custo da tecnologia e também pela falta de políticas. Em 2001, o país passou por uma crise energética, fazendo com que aumentasse o incentivo para a contratação de empreendimentos eólicos, quando foi criado o PROEÓLICA, Programa Emergencial de Energia Eólica, esse programa que tinha como objetivo a contratação de 1050 MW de projetos de energia eólica até dezembro de 2003. Esse programa não obteve resultados favoráveis e foi substituído pelo PROINFA, Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia (CERNE, 2013).

O Programa de Incentivo às fontes alternativas de energia elétrica (PROINFA), foi instituído pela lei nº10,438/2002. É responsável pela comercialização da energia gerada pelos empreendimentos contratados no âmbito do proinfa por um prazo de 20 anos.

Maior programa do mundo de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica, o proinfa contribui para a diversificação da matriz energética nacional, além de ter fomentado a geração de milhares de empregos diretos e indiretos em todo o país, proporcionando grande avanço industrial e internalização de tecnologia de ponta. Além disso, o programa possibilita a redução de emissão de gases de efeito estufa (ELETROBRAS, 2017).

A implantação da contratação e seleção dos empreendimentos para compra e venda de energia são realizados pela Eletrobrás (INTERENERGIA, 2011).

Após a instalação desse programa, a participação da energia eólica na geração de energia elétrica ainda era pequena. Em setembro de 2003 havia apenas 6 centrais eólicas em operação no país, somando uma capacidade instalada de 22075 kW, no estado do Ceará.

A energia eólica no Brasil atingiu uma capacidade instalada de 602 MW no final de 2009, estavam localizados no Nordeste (5 estados), Sul (3 estados), e Sudeste (1 estado) (SOARES, 2010).

No final de 2009, mais precisamente dia 14 de dezembro, ocorreu o segundo Leilão de Energia Reserva (LER), que foi o primeiro leilão de comercialização de energia voltado exclusivamente para a fonte eólica. No qual cerca de 1800 MW foram contratados com 71 usinas de energia eólica programadas para entrar em operação comercial a partir de 1 de julho de 2012.

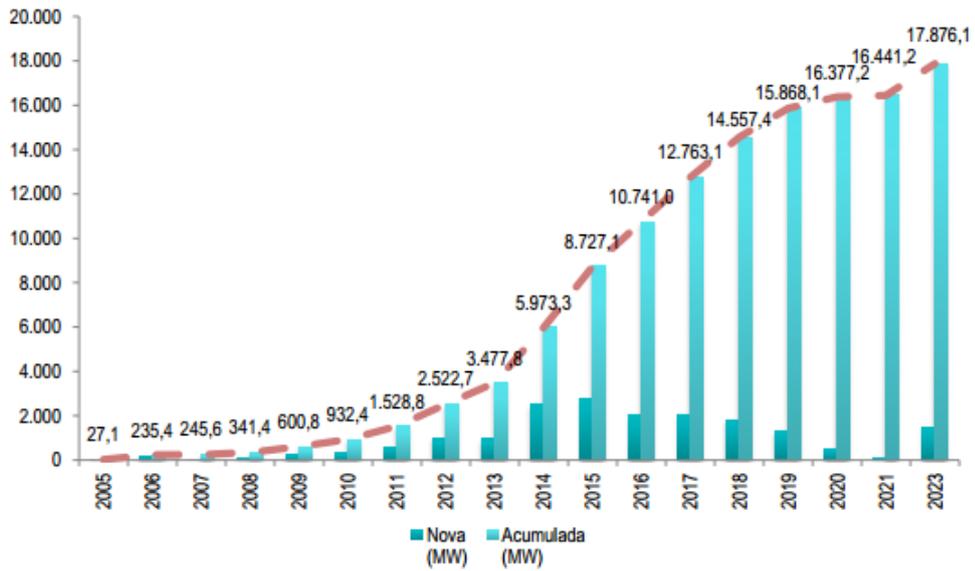
Em 2013, foram contratados 4,71 GW de potência, um recorde celebrado pelo setor e certamente um ano que virou um marco histórico. Em 2014, a contratação foi de 2,25 GW, em três leilões. No ano de 2015, o montante total de energia contratada em leilões foi de 1,2 GW (ABEEOLICA, 2018).

Ao focalizar internamente na geração de energia eólica, o Brasil é a parte de um movimento internacional para tornar a energia eólica uma fonte primária de energia. Na verdade, a energia eólica tem tido a maior taxa de expansão de todas as fontes renováveis de energia disponíveis, com um crescimento médio de 27% por ano desde os anos 90.

Dados consolidados do boletim InfoMercado mensal da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica indicam que a geração de energia eólica em operação comercial no Sistema Interligado Nacional, em 2017, subiu 26,5% em relação a 2016. As usinas movidas pela força do vento somaram 4619 MW médios entregues ao longo do ano passado frente aos 3651 MW médios gerados no mesmo período de 2016.

A representatividade da fonte eólica em relação a toda energia gerada no período pelas usinas do sistema alcançou 7,4% em 2017. A fonte hidráulica – incluindo as Pch' – foi responsável por 70,7% do total e as usinas térmicas responderam por 21,8% (CANAL ENERGIA, 2018). A figura abaixo irá ilustrar a evolução da capacidade instalada no Brasil.

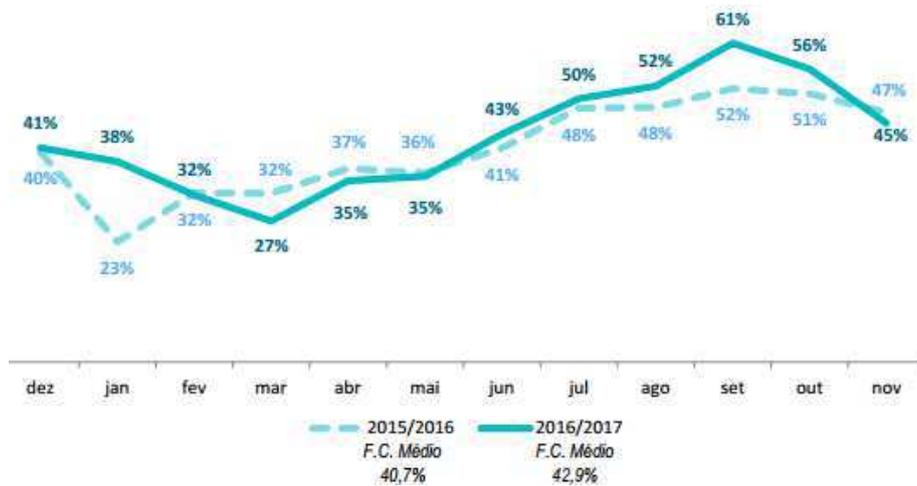
Figura 18: Evolução da capacidade instalada.



Fonte: ABEEOLICA (2018).

O Brasil tem alguns dos melhores ventos do mundo. O relatório 2015 *Global Wind Market Report*, do GWEC (*Global World Energy Council*), aponta que o vento é três vezes superior à necessidade elétrica do país. Além disso, os fatores de capacidade brasileiros são acima da média mundial. Enquanto os outros países giram na média de 25%, o Brasil pode chegar a 50%, como pode ser observado no gráfico abaixo.

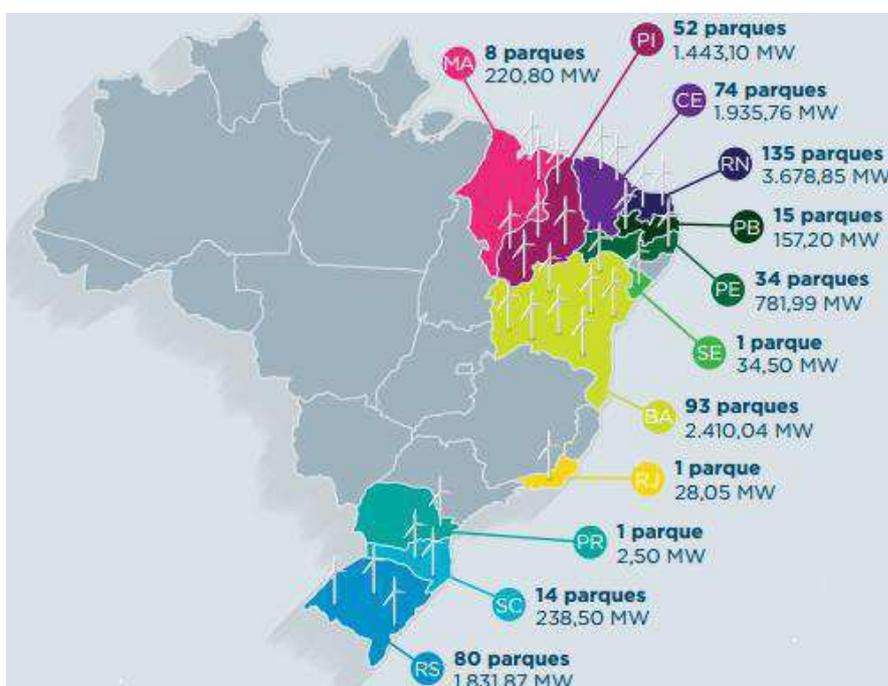
Figura 19: Fator de Capacidade.



Fonte: ABEEOLICA (2018).

De acordo com o ranking divulgado pelo conselho global de energia eólica (GWEC, sigla em inglês), o país se tornou líder de produção desse tipo de energia na América latina. Diante desse fato, os dados consolidados da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica CCEE em 2017 confirmam ainda o estado do Rio grande do Norte com a maior capacidade instalada totalizando 3548,65 MW, aumento de 11,5% em relação a 2016 quando a capacidade instalada totalizava 3181,35 MW. Em seguida aparece a Bahia com 2414,94 MW, crescendo 38%; o Ceará com 2134,96 MW subiu 10,6%; Rio Grande do Sul com 1777,87 MW com incremento de 9,6% e o Piauí com 1443,10 MW de capacidade aumento de 57,7%, abaixo tem a capacidade instalada e a capacidade de cada estado detalhada.

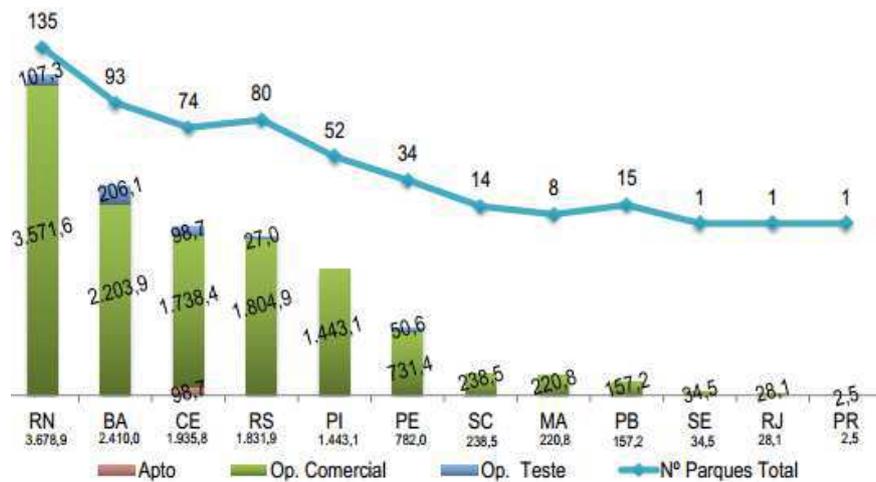
Figura 20: Capacidade instalada e número de parques por estado.



Fonte: ABEEOLICA (2018).

Avaliando a situação dos parques eólicos, quando já instalados são subdivididos em três categorias: Aptos a operar, operando em teste e operando comercialmente. Como já visto, a capacidade instalada no início de 2018 foi de 12,76 GW, assim como está ilustrado na Figura 11.

Figura 21: Potência Instalada (MW).



Fonte: ABEEOLICA (2018).

Dados mais atualizados apontam que o Brasil atingiu a marca de 13 GW de capacidade instalada de energia eólica, com 518 parques eólicos e mais de 6600 aerogeradores operando. Segundo informa a Associação Brasileira de Energia Elétrica, a energia gerada já chega a abastecer mais de 10% do país em alguns meses, mais de 60% do nordeste. Em construção ou já contratados há mais de 4,8 GW, divididos em 213 parques que serão entregues nos próximos anos, até 2023. Levando o setor para a marca de 19 GW, significando que toda capacidade eólica será maior que Itaipu que conta com 14 GW de capacidade instalada (ABEEOLICA, 2018).

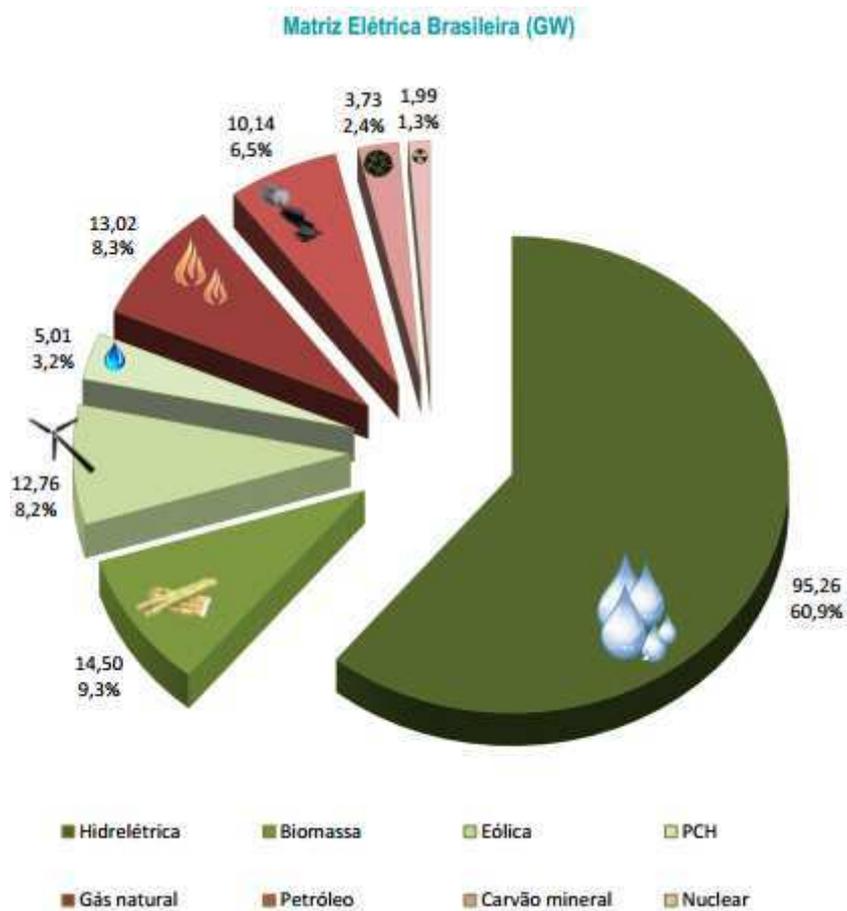
Tabela 2: Parques e potência por estados. Atualizado em 20/02/2018.

UF	Potência (MW)	Nº de Parques
RN	3722,45	137
BA	2594,54	100
CE	1950,46	75
RS	1831,87	80
PI	1443,10	52
PE	781,99	34
SC	238,50	14
MA	220,80	8
PB	157,20	15
SE	34,50	1
RJ	28,05	1
PR	2,50	1
Total	13005,95	518

Fonte: ABEEOLICA (2018).

A matriz elétrica brasileira, que apresenta uma configuração renovável-térmica, iniciou o ano de 2018 com uma participação de 8,2% de energia eólica, a instalação de 2,02 GW ao longo de 2017 proporcionou um significativo aumento de 18,8%. Como pode ser visto com mais detalhes na figura abaixo.

Figura 22: Matriz Energética brasileira.

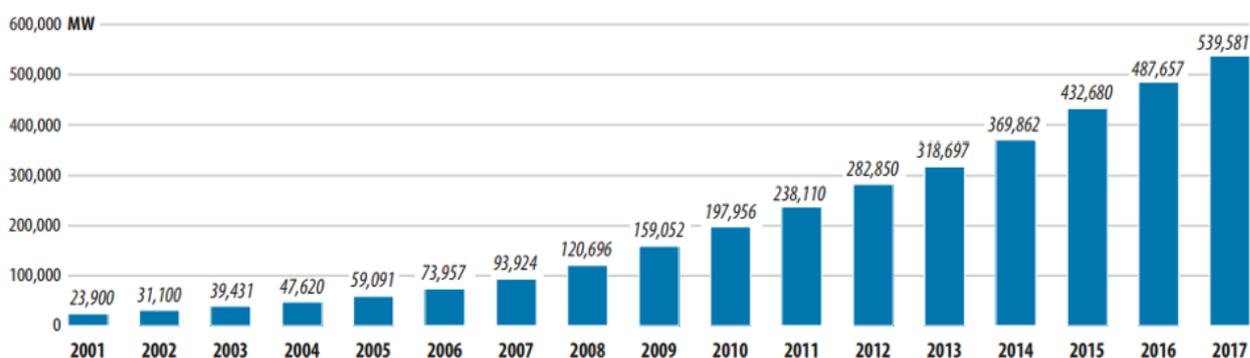


Fonte: ABEEOLICA (2018).

3.2. ENERGIA EÓLICA NO MUNDO

A partir de dados divulgados no “*Global Wind Statistics 2017*”, documento anual com dados mundiais de energia eólica que mostra que, em 2017, foram adicionados 52,57 GW de potência eólica a produção mundial, totalizando 539,58 GW de capacidade instalada. A Figura 13 mostra o crescimento mundial desde 2001:

Figura 23: Crescimento mundial da capacidade instalada de Energia Eólica.



Fonte: GWEC (2018).

No ranking dos dez países com mais capacidade instalada total de energia eólica, o Brasil subiu uma posição e aparece em oitavo, com 12,76 GW de capacidade instalada, assim como pode ser visto detalhadamente na figura abaixo juntamente com os outros países.

Figura 24: Os 10 maiores países em capacidade instalada.

Country	MW	% Share
PR China*	188,232	35
USA	89,077	17
Germany	56,132	10
India	32,848	6
Spain	23,170	4
United Kingdom	18,872	3
France	13,759	3
Brazil*	12,763	2
Canada	12,239	2
Italy	9,479	2
Rest of the world	83,008	15
Total TOP 10	456,572	85
World Total	539,581	100

Fonte: GWEC (dez 2017).

No ranking de nova capacidade instalada no ano, o Brasil ocupa o sexto lugar mundial, tendo instalado 2,02 GW de nova capacidade em 2017.

Figura 25: Os 10 maiores países em capacidade instalada no ano de 2017.

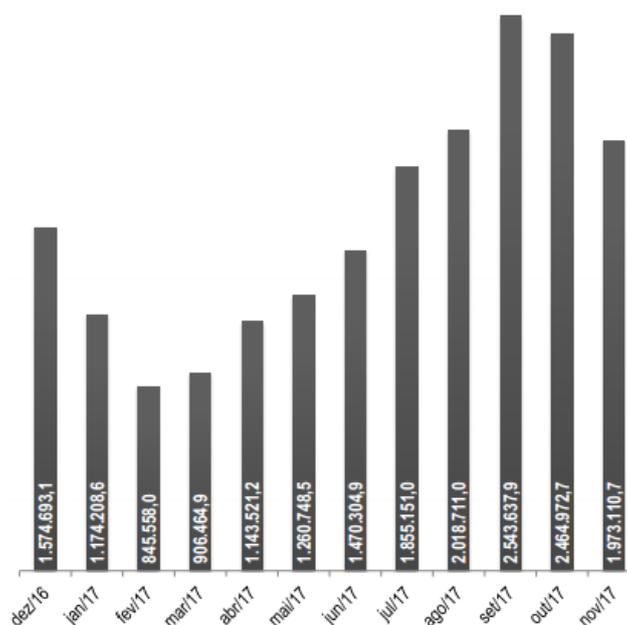
Country	MW	% Share
PR China*	19,500	37
USA	7,017	13
Germany	6,581	13
United Kingdom	4,270	8
India	4,148	8
Brazil*	2,022	4
France	1,694	3
Turkey	766	1
Mexico	478	1
Belgium	467	1
Rest of the world	5,630	11
Total TOP 10	46,943	89
World Total	52,573	100

Fonte: GWEC (dez 2017).

Apesar de grandes vantagens as eólicas têm outros benefícios que podem ser evidenciados se levar em consideração o impacto ambiental, pois contribui para que o Brasil cumpra o acordo do clima, não emitindo CO2 em sua operação.

A emissão de CO2 evitada nos últimos 12 meses corresponde a emissão anual equivalente de cerca de 13 milhões de automóveis, assim como pode ser visto a redução de cada mês na Figura 16.

Figura 26: Emissões de CO2 evitadas em toneladas por mês.



Fonte: ABEEOLICA (2018).

3.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

VANTAGENS

- É uma fonte de energia que não apresenta gastos com o combustível.
- Tempo de implantação pequeno, se comparado ao tempo de construção de uma hidrelétrica.
- Não há limitação do uso das áreas distintas para os aerogeradores, já que estas também podem ser usadas paralelamente para outros fins: cultivos agrícolas, prática de pecuária, etc.
- Apresenta uma excelente complementaridade com o sistema hídrico, pois no período de estiagem coincide com o período de ventos com maiores velocidades.
- É uma fonte de energia parcialmente limpa e inesgotável, quanto mais parques eólicos forem construídos, menos gases de efeito estufa como o CO₂ serão emitidos para a atmosfera, como já foi visto neste trabalho.

DESVANTAGENS

- Alteração visual: Parques eólicos com grandes quantidades de aerogeradores provocam alteração no visual, devido às enormes pás dessas turbinas, já está sendo posta em prática uma forma de amenizar esse problema, estão começando a pintar as pás de azul ou branco.
- Mortalidade das aves: Verificar se a região de implantação do parque não é rota migratória de pássaros, já que a mortalidade desses é um grande embróglio para efetivação do projeto.
- Equipamentos ainda com elevados preços.
- A circulação do ar é modificada pelas turbinas o que pode vir afetar o clima local e gerar micro-climas.
- Emissão de ruídos: O barulho pode ser prejudicial aos seres humanos e perturbar animais que nessas regiões habitam. Apesar do nível do ruído ter diminuído à medida que tais máquinas foram aperfeiçoadas.

- Reflexão de ondas magnéticas: Possível ocorrência de interferência em sistemas de telecomunicação implica na necessidade de grande distanciamento entre parques eólicos e qualquer sistema que dependa de pouquíssima interferência em seus sistemas de dados.
- Imprevisibilidade: O estocástico trabalho de coletar dados do vento, para que seja feito um eficiente acervo de dados, para que assim o projeto seja viável.

3.4. CURIOSIDADE: PARQUE EÓLICO OFF-SHORE

Devido a grandes vantagens oferecidas, o mar tem sido o destino de alguns parques eólicos. Dentre essas vantagens têm-se: perenidade e uniformidade dos ventos, o que resulta em maiores efeitos decorrentes de turbulências; Maior velocidade dos ventos (possivelmente de modo proporcional a distância da costa); redução de algumas externalidades negativas, como emissão de ruídos e impacto a vizinhança; possibilidade de implantação de turbinas maiores, ante a ausência de limite de peso para transporte dos componentes.

No entanto, a instalação dessa tecnologia é bem mais complicada devido a necessidade de profundos conhecimentos (PORTAL-ENERGIA, 2017).

Figura 27: Maior parque eólico offshore do mundo – London Array – Inglaterra.



Fonte: PORTAL-ENERGIA (2015).

London Array é o maior parque offshore do mundo desde 2013 e encontra-se na Inglaterra. Possui 175 aerogeradores Vestas SWT-36 MW-120 com um diâmetro do rotor de 90m, a potência instalada é de 630 MW.

No fim de 2017, a Austrália anunciou um projeto que pode representar o primeiro parque eólico offshore no país e o maior do mundo. Projeto com capacidade de 2 GW, composto por 250 aerogeradores com uma potência individual de 8 MW (PORTAL-ENERGIA, 2017).

3.5. ENERGIA EÓLICA OFF-SHORE NO BRASIL

Mesmo com os evidentes benefícios e com potencial eólico *offshore* pátrio maior do que duas vezes todo o parque de geração de energia elétrica nacional – ou seja, um verdadeiro “pré-sal eólico” – não há usinas do tipo instaladas em águas marítimas brasileiras. Se as áreas com melhores potenciais eólicos fossem aproveitadas, especificamente no litoral de Alagoas, Sergipe, Ceará e Rio Grande do Norte, carências hídricas no Nordeste poderiam ser minimizadas. Em 2017, foi observado um dos piores níveis dos reservatórios da região, fato esse que acarreta na redução das possibilidades de geração hidrelétrica e aumenta a dependência de energia proveniente de termoelétricas, que nem sempre são suficientes para suprir adequadamente as demandas dos consumidores.

Investindo nas eólicas *offshore*, conhecidas como *windfarms*, além de desenvolver o potencial energético do país, o Brasil estará gerando mais empregos na atividade marítima, pois embarcações bem parecidas com as que fazem o apoio à atividade petrolífera teriam que ser utilizadas para diversos fins dando apoio a atividade eólica *offshore* (CINTRA, 2017).

Não é algo a ser instalado facilmente, o custo é altíssimo e não há uma indústria local para suporte, mas algum passo dever ser dado nessa tecnologia. Com isso, o país estaria profundamente engajado na geração de uma energia limpa.

4. PROJETO BÁSICO: ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA NA CONSTRUÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO EM PERNAMBUCO.

Um projeto básico, segundo a lei brasileira 8.666 de 21 de junho de 1993, é o conjunto de elementos necessários e suficientes, com nível de precisão adequado, para caracterizar a obra ou serviço, ou complexo de obras ou serviços objeto da licitação, elaborado com base nas indicações dos estudos técnicos preliminares, que assegurem a viabilidade técnica e o adequado tratamento do impacto ambiental do empreendimento, e que possibilite a avaliação do custo da obra e a definição dos métodos e do prazo de execução (PLANALTO, 2010).

Tem se discutido bastante sobre as questões relacionadas à energia elétrica no Brasil. Estas discussões se acentuam com a escassez de chuva e o aumento do risco de falta de energia em função da representatividade da geração de energia hidrelétrica na matriz energética do país, assim como mostrado nesse trabalho na figura 12.

Além disso, a sociedade como um todo e os ambientalistas têm feito constantes pressões no governo para aumento da geração de energia a partir de fontes renováveis, a chamada energia limpa.

Uma das possíveis fontes alternativas de energia renovável é a energia eólica, no entanto o desenvolvimento de projetos eólicos no país possui vários aspectos que devem ser considerados, para que se tenha um resultado eficaz.

Portanto, é importante identificar os pontos críticos no desenvolvimento de qualquer projeto de energia eólica através da definição e avaliação de cada etapa assim como será feito nesse tópico.

4.1. ASPECTOS CONSIDERADOS PARA O ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Os gastos com um parque eólico estão na casa de dezenas ou centenas de milhões de reais, por isso o estudo da viabilidade é imprescindível para sua implantação. O estado de Pernambuco foi escolhido como a região do projeto, e assim serão analisados os devidos aspectos necessários, estado mostrado na Figura 28.

Figura 28: Estado de Pernambuco.



Fonte: Departamento de cartografia da UFPE (2002).

Para escolher a cidade sede deste parque serão analisados o relevo e a rugosidade do local, a velocidade média anual dos ventos a uma altura de 50 a 100 metros. Assim como, investimentos de implantação, custos de produção, equipamentos utilizados, impostos, mão de obra, manutenção e financiamento.

O método da TIR será utilizado para analisar a viabilidade econômico-financeira, e o modelo de fluxo de caixa descontado (FCD) será utilizado para calcular o fluxo de caixa do investimento.

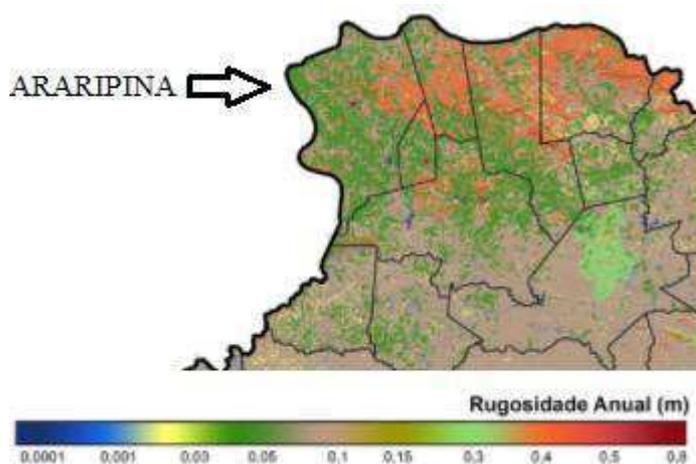
Ao final serão analisados os resultados obtidos e possíveis soluções para o maior incentivo do uso de energias renováveis.

4.2. ANÁLISE DA REGIÃO ESCOLHIDA

O fator de capacidade no Brasil, assim como mostrado na figura 9 deste trabalho, teve média de 42,9% no ano de 2017, conseguindo chegar em 61% em setembro do mesmo ano. Ao observar a região de estudo desse trabalho, o sertão do Araripe, mais precisamente no município de Araripina, apresenta um fator de capacidade eólico de 40,6%, em uma altura de 100 metros, assim como as melhores médias de velocidades anuais do vento como será mostrado posteriormente.

De posse do atlas eólico de Pernambuco conclui-se que o sertão do Araripe possui velocidade média anual do vento próxima a 8m/s (medidas a 100m de altura), e possui uma constância dessa velocidade. Araripina tem uma área de 2037,1 km², e consta com 1558,7 km² de área disponível para eólica, a uma altura de 100 m. Está localizada a uma altitude entre 600 a 900 metros com rugosidade baixa, em torno de 0,05 a 0,1 metros, como pode ser visto no **anexo A e B**, respectivamente (ATLAS EÓLICO PE, 2017). Fatores favoráveis a construção do parque eólico.

Figura 29: Rugosidade no município de Araripina.



Fonte: Atlas Eólico - PE (2017).

Influência da altura na velocidade dos ventos na região

A influência da altura da colocação dos aerogeradores, como foi detalhado no tópico 2.3 deste trabalho, e poderá ser observado no **anexo C e D**, mostrando em específico o potencial eólico anual a 50 e 100 metros de altura na região do sertão do Araripe.

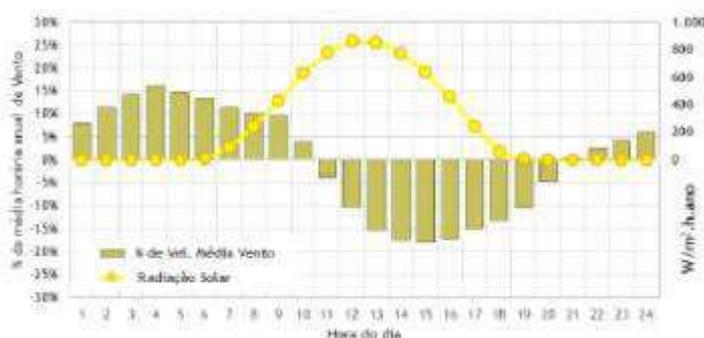
Nesse estudo será utilizado o aerogerador a 100 metros de altura. Sendo assim utilizada a velocidade 8 m/s.

Usina Híbrida – Sertão de Pernambuco

Nas regiões do Rio Grande Norte e da Paraíba os ventos são constantes. Diferentemente do que acontece no sertão de Pernambuco, em que os regime de ventos é maior a noite e durante a madrugada, enquanto durante o dia praticamente não tem vento, mas tem sol.

Diante desse cenário, a utilização da usina híbrida torna-se ideal. Pernambuco foi o primeiro estado brasileiro a inaugurar um parque híbrido, em 2015 no sertão do São Francisco. Como já dito, e será confirmado na figura abaixo o sertão é a área com maior potencial para abrigar esses parques.

Figura 30: Dia típico eólico e solar no Sertão do Araripe.



Fonte: Atlas Eólico - PE (2017).

No Sertão do Araripe o vento tem um ciclo mais noturno, com máximos horários entre 2-4 da manhã e mínimos entre 13-15 horas. Pelos dias e anos típicos das diversas regiões de Pernambuco pode-se observar que a solução de geração híbrida, com eólica e solar como uma única estrutura, não só potencialmente suaviza as oscilações de produção durante o dia, como também apresenta complementaridade durante o ano.

Equipamentos escolhidos

Serão utilizados aerogeradores instalados a uma altura de 100 metros e com diâmetro de rotor superior a 70 metros. Com isso, foi selecionado o aerogerador da marca *Wobben* modelo E82 com potência nominal de 200 KW e diâmetro de 82 metros. Para uma potência de estudo de 30 MW serão necessários 15 aerogeradores.

Custos dos equipamentos e custos de produção

O custo médio da estrutura de um parque eólico fornecida pela empresa *WobbenWindpower* fica em torno de R\$ 4,2 milhões por MW instalado. Diante disso, como a proposta é de um parque eólico de 30 MW de potência nominal instalada, têm-se um custo inicial de R\$ 126 milhões de reais.

Em 2017, mais precisamente em 18 e 20 de dezembro, foram realizados dois leilões com participação da energia eólica, A-4 e A-6. O valor que será utilizado para o parque eólico em estudo será R\$ 108,00 por MWh, do leilão A-4 que deverão iniciar o fornecimento de energia elétrica a partir de 1 de janeiro de 2021 (ABEEOLICA, 2018).

Financiamento

O BNDES apóia financeiramente projetos de energias renováveis. O valor mínimo do financiamento é 10 milhões e a participação máxima do BNDES é de 80% do investimento inicial, com um prazo de amortização de 16 anos. As condições do financiamento são 0,9% ao ano, acrescido de 4,18% ao ano de taxa de risco de crédito, mais 5% taxa de juros em longo prazo (ILDEU, 2014).

4.3. ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA: MÉTODOS UTILIZADOS

Demonstrativo de Resultado de Exercício (DRE): Neste item são mostrados os lucros e as despesas obtidas em um período específico de tempo, incluindo débitos que não estão envolvidos em caixa, como depreciação e amortização de alguns ativos, e também impostos. Estão inclusos nesse DRE: compras de bens e serviços, despesas de comercialização, depreciação de ativos, vendas à vista ou a prazo, salários pagos (HELFERT, 1997).

Demonstrativo do Fluxo de Caixa: O demonstrativo do fluxo de caixa concentra os resultados operacionais e as mudanças no balanço patrimonial, fornecendo uma análise dinâmica das últimas mudanças no caixa, que mostram o resultado das decisões tomadas durante um determinado período de tempo (HELFERT, 1997).

Fluxo de Caixa Descontado (FCD): O método do FCD considera o valor da moeda no tempo e usa para verificar se a margem do fluxo de receita do projeto vale mais que o custo para a criação do produto ou serviço do projeto. Ou seja, o dinheiro que se tem hoje vale mais do que o dinheiro que possa ser ganho no futuro, pois o dinheiro que o empregador possui hoje pode ser investido para gerar lucro, depositado, etc (ILDEU, 2014).

Taxa interna de Retorno (TIR): A TIR, método que será utilizado nesse estudo, calcula a taxa de juros a ser aplicada no valor presente das entradas de fluxo de caixa esperadas, para que o valor das entradas de caixa seja igual ao valor do investimento original. De modo geral, quanto maior a taxa interna de retorno, mais rentável é o projeto, se a TIR estudada for maior que a taxa mínima de atratividade (TMA), a empresa estará aumentando seu patrimônio com o projeto.

A TIR de um projeto representa a taxa de juros para a qual os valores das despesas, trazidas ao valor presente, seja igual ao valor do retorno dos investimentos, também em valor presente. Portanto, deve ser comparada com a TMA para a conclusão se o projeto pode ou não ser aceito. Se a TIR for maior que a TMA, o projeto é atrativo. Se a TIR for menor que a TMA, o investidor pode escolher aplicar seu capital em uma opção mais segura e que rende a TMA.

O modelo escolhido para o cálculo de fluxo de caixa desse trabalho é o Fluxo de Caixa Descontado (FCD), usando o Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) como a taxa para deflacionar os juros e amortizações do financiamento, assim como as depreciações do projeto.

4.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A energia que é realmente gerada pelo parque eólico é o somatório da energia de cada turbina menos as perdas que ocorrem no sistema (período para manutenção, perdas no sistema elétrico, indisponibilidades da rede elétrica (ILDEU, 2014). Tudo isso é englobado pelo fator de capacidade (FC) do parque. Neste estudo foi considerado um FC de 40,6% de acordo com o (Atlas Eólico de PE), e de acordo com as turbinas (Wobben) para ventos médios de 8m/s durante o ano.

A produção anual de energia P_{AE} é estimada por:

$$P_{AE} = 8760 \cdot P_{INST} \left(\frac{FC}{100} \right) [KWh]$$

Onde:

P_{INST} = Potência Instalada [KW];

FC = Fator de Capacidade [%];

Na Tabela 3 abaixo, serão detalhados os parâmetros iniciais do projeto.

Tabela 3: Parâmetros iniciais do projeto.

Parâmetros	Valor Utilizado
Potência Nominal Instalada	30[MW]
Fator de Capacidade Bruto	$FC_B=40,7\%$
Fator de Disponibilidade	FD = 97%
Perdas	4%
Fator de Capacidade Líquida	$FC_L=FC_B \cdot FD \cdot (1-\text{perdas})$
Tarifa de Energia Eólica (2017)	108,00[R\$/MWh]
Receita brutal anual	10754091,36

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 4 são apresentadas as despesas do projeto.

Tabela 4: Despesas do projeto.

Despesas	Valor Utilizado
Custos de implantação – 4,2 milhões [R\$/MW]	R\$ 126.000.000,00
Custos pré-operacionais – 2% do custo de implantação	R\$ 2.520.000,00
Arrendamento	1% da receita bruta
Seguro	0,30% do custo de implantação
Custos com operação e manutenção	1% do custo de implantação
Tarifa de transmissão de energia	1,62[R\$/kW/ano]
Taxa de fiscalização dos serviços de energia elétrica	1,93[R\$/kW/ano]

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 5 estão os períodos utilizados nesse estudo, desde o período do contrato de compra e venda de energia (CCVE) até os períodos de depreciação pré-operacional e de equipamentos.

Tabela 5: Períodos do projeto.

Períodos	Valor Utilizado
Período do contrato de compra e venda de energia	20 anos
Depreciação dos equipamentos	5% ao ano
Depreciação de custos pré-operacionais	20% ao ano
Duração do estudo	20 anos

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 6 são definidos os parâmetros do financiamento fornecidos pelo BNDES (BNDES, 2018).

Tabela 6: Parâmetros do financiamento.

Parâmetros	Valor Utilizado
Taxa de juros anuais	TJLP+0,9%+4,18% = 10,08% ao ano
Tempo para amortização	16 anos
Taxa de juros de longo prazo (TJLP)	5% ao ano
Total Financiado	80% = R\$ 102.816.000,00
Total não financiado (20%)	25.704.000
Forma de amortização	SAC

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 7 têm-se os impostos que incidirão sobre o projeto estudado, considerando o IPCA, que foi usado para deflacionar as amortizações e os juros de financiamento, assim como as depreciações pré-operacionais e de equipamentos (ILDEU, 2014).

Tabela 7: Impostos do projeto.

Parâmetros	Valor Utilizado
PIS/PASEP	1,65% da receita bruta
COFINS	7,60% da receita bruta
CSLL	9% sobre o resultado antes do IR
IR	15% até 240mil mais 10% sobre o excedente
IPCA	5,9%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 8 são mostrados os valores calculados para as depreciações dos equipamentos (20 anos). Usando a seguinte expressão:

$$D_E = \frac{(\text{Custo de implantação} \cdot 0,05)}{(1 + \text{IPCA})^{n-1}}$$

Tabela 8: Depreciação dos Equipamentos (valor presente).

Ano	Depreciação dos Equipamentos
0	
1	R\$ 6.300.000,00
2	R\$ 5.949.008,49
:	:
17	R\$ 2.517.707,00
18	R\$ 2.377.438,15
19	R\$ 2.244.984,09
20	R\$ 2.119.909,43

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 9 é apresentado os valores dos custos pré-operacionais trazidos para valor presente, usando a seguinte expressão:

$$D_{PRE-OP} = \frac{(\text{Custos pré-operacionais} \cdot 0,2)}{(1 + \text{IPCA})^{n-1}}$$

Tabela 9: Depreciação dos custos pré-operacionais (valor presente).

Ano	Depreciação Pré-operacional
0	
1	R\$ 504.000,00
2	R\$ 475.920,67
3	R\$ 449.405,74

4	R\$ 424.368,02
5	R\$ 400.725,23

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 10 são apresentados os cálculos relativos ao financiamento do projeto utilizando o SAC (Sistema de Amortização Constante), usando as seguintes expressões:

Juros = Saldo devedor x Taxa de juros (10,08%);

Amortização = $\frac{\text{Valor Financiado}}{\text{Período de Amortização}}$;

Tabela 10: Financiamento do projeto utilizando o SAC.

Ano	Saldo Devedor	Amortização	Juros
0	R\$ 102.816.000,00		
1	R\$ 96.390.000,00	R\$ 6.426.000,00	R\$ 9.716.112,00
2	R\$ 89.964.000,00	R\$ 6.426.000,00	R\$ 9.068.371,20
:	:	:	:
14	R\$ 12.852.000,00	R\$ 6.426.000,00	R\$ 1.295.481,60
15	R\$ 6.426.000,00	R\$ 6.426.000,00	R\$ 647.740,80
16	R\$ 0,00	R\$ 6.426.000,00	R\$ 323.870,40

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 11, serão mostradas as prestações assim como os juros descontados e a amortização descontada, de acordo com as expressões:

$$\text{Prestações} = \text{Juros} + \text{Amortizações};$$

$$\text{Amortização Descontada} = \frac{\text{Amortização}}{(1+IPCA)^{n-1}};$$

$$\text{Juros Descontados} = \frac{\text{Juros}}{(1+IPCA)^{n-1}};$$

Tabela 11: Financiamento do projeto utilizando o SAC (II).

Ano	Prestações	Juros Descontados	Amortização Descontada
0			
1	R\$ 16.142.112,00	R\$ 9.716.112,00	R\$ 6.426.000,00
2	R\$ 14.631.134,26	R\$ 8.563.145,60	R\$ 6.067.988,66
:	:	:	:
14	R\$ 3.664.824,30	R\$ 614.870,65	R\$ 3.049.953,65
15	R\$ 3.170.338,97	R\$ 290.307,20	R\$ 2.880.031,77
16	R\$ 2.856.643,41	R\$ 137.066,66	R\$ 2.719.576,75

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 12 é mostrada a remuneração do capital próprio (Juros TJLP e SAC), usando as expressões:

$$\text{Amortização} = \frac{\text{Valor Financiado}}{\text{Período de Amortização}};$$

$$\text{Juros} = \text{Saldo devedor} \times \text{Taxa de juros (5\%)};$$

Tabela 12: Remuneração do Capital Próprio.

Ano	Saldo Devedor	Amortização	Juros
0	R\$ 25.704.000,00		
1	R\$ 24.097.500,00	R\$ 1.606.500,00	R\$ 1.204.875,00
2	R\$ 22.491.000,00	R\$ 1.606.500,00	R\$ 1.124.550,00
:	:	:	:
14	R\$ 3.213.000,00	R\$ 1.606.500,00	R\$ 160.650,00
15	R\$ 1.606.500,00	R\$ 1.606.500,00	R\$ 80.325,00
16	R\$ 0,00	R\$ 1.606.500,00	R\$ 40.162,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

Utilizando todos os valores calculados nas tabelas anteriores, foi feita a Tabela 13 do Demonstrativo de Resultado do Exercício e a partir de valores do resultado líquido final é feita a tabela 14 apresentando o Fluxo de Caixa Descontado que será usado para o cálculo da TIR e fazer a análise precisa do projeto.

Tabela 13: Demonstrativo de Resultado de Exercício – DRE (Valores em milhões de Reais).

	Ano	0	1	2	3	9	10	11	18	19	20
Tarifa de Energia (2017)	108		108	108	108	108	108	108	108	108	108
Demonstrativo dos Resultados											
Receita Bruta	10.754.091	10.754.091	10.754.091	10.754.091	10.754.091	10.754.091	10.754.091	10.754.091	10.754.091	10.754.091	10.754.091
(-) Impostos sobre receita bruta	9,25%	994.753	994.753	994.753	994.753	994.753	994.753	994.753	994.753	994.753	994.753
PIS/PASEP	1,65%	177.442	177.442	177.442	177.442	177.442	177.442	177.442	177.442	177.442	177.442
COFINS	7,60%	817.310	817.310	817.310	817.310	817.310	817.310	817.310	817.310	817.310	817.310
(-) Receita Operacional		9.759.338	9.759.338	9.759.338	9.759.338	9.759.338	9.759.338	9.759.338	9.759.338	9.759.338	9.759.338
(-) Despesas Operacionais		8.656.040	8.276.968	7.919.016	5.834.696	5.612.811	5.403.287	4.229.478	4.097.024	3.971.949	
Taxa ANEEL-TFSEE	57.900	57.900	57.900	57.900	57.900	57.900	57.900	57.900	57.900	57.900	57.900
Taxa transporte energia	48.600	48.600	48.600	48.600	48.600	48.600	48.600	48.600	48.600	48.600	48.600
Operação e Manutenção	1,00%	1.260.000	1.260.000	1.260.000	1.260.000	1.260.000	1.260.000	1.260.000	1.260.000	1.260.000	1.260.000
Seguro	0,30%	378.000	378.000	378.000	378.000	378.000	378.000	378.000	378.000	378.000	378.000
Arrendamento do terreno	1,00%	107.540	107.540	107.540	107.540	107.540	107.540	107.540	107.540	107.540	107.540
Depreciação Equipamentos	20 anos	6.300.000	5.949.008	5.617.571	3.982.656	3.760.771	3.551.247	2.377.438	2.244.984	2.119.909	
Depreciação custos pré-operacionais	5 anos	504.000	475.920	449.405							
(-) Resultado operacional		1.103.298	1.482.370	1.840.322	3.924.642	4.146.527	4.356.051	5.529.860	5.662.314	5.787.389	
(-) Despesas Financeiras		10.920.969	9.687.695	8.552.716	3.428.640	2.801.954	2.227.250	0	0	0	
Remuneração Capital Próprio	5,00%	1.204.857	1.124.550	1.044.225	562.275	481.950	401.625	0	0	0	
Juros do Financiamento	10,08%	9.716.112	8.563.145	7.508.491	2.866.365	2.320.004	1.825.625	0	0	0	
(-) Resultado antes do IR		9.817.671	8.205.325	6.712.394	496.002	1.344.573	2.128.801	5.529.860	5.662.314	5.787.389	
(-) Impostos		0	0	0	0	433.153	699.792	1.856.152	1.901.186	1.943.711	
IRPJ	15%	0	0	0	0	201.685	319.320	829.479	849.347	868.108	
Adicional IRPJ	10%	0	0	0	0	110.457	188.880	528.986	542.231	554.738	
CSLL	9%	0	0	0	0	121.011	191.592	497.687	509.608	520.865	
(=) Resultado Líquido Final		9.817.671	8.205.325	6.712.394	496.002	911.420	1.429.009	3.673.708	3.761.128	3.843.678	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 14: Fluxo de Caixa Descontado - FCD (Valores em milhões de Reais).

	Ano	0	1	2	3	9	10	11	18	19	20
Resultado Líquido			9.817.671	8.205.325	6.712.394	496.002	911.420	1.429.009	3.673.708	3.761.128	3.843.678
(+) Depreciação			6.300.000	5.949.008	5.617.571	3.982.656	3.760.771	3.551.247	2.377.438	2.244.984	2.119.909
(+) Custos pré-operacionais			504.000	475.920	449.405	0	0	0	0	0	0
(+) Remuneração do Capital Próprio			1.204.875	1.124.550	1.044.225	562.275	481.950	401.625	0	0	0
(+) Financiamento		102.816.000									
(-) Amortização do Financiamento		0	6.426.000	6.067.988	5.729.923	4.062.309	3.835.986	3.622.272	0	0	0
(-) Investimento		128.520.000									
(=) Fluxo de Caixa Líquido		25.704.000	8.234.796	6.723.835	5.331.116	13.380	504.685	1.098.409	6.051.146	6.006.112	5.963.587
(=) Saldo Acumulado		25.704.000	33.938.796	40.662.631	45.993.747	57.346.772	57.851.457	58.949.866	36.773.658	30.767.546	24.803.959
TIR		-6,77%									

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após analisar as Tabelas 13 e 14, foi observada uma TIR negativa de -6,77%. Uma TIR negativa implica que o projeto não é viável, se considerados os parâmetros utilizados nesse estudo. Com isso, são necessárias políticas públicas de incentivo, como o PROINFA, para que esses projetos sejam viáveis economicamente e haja uma maior participação das fontes renováveis de energia na matriz energética brasileira.

Alguns parâmetros poderiam ser otimizados como:

- O valor fornecido pelo fabricante foi de R\$ 4,2/MW instalado, com a melhoria da tecnologia os custos iniciais de uma planta eólica poderiam ser de R\$ 3,4 milhões/MW instalado, gerando uma economia de 24 milhões de reais.
- O fator de Capacidade (FC) do projeto, 40,6%, é considerado bom de acordo com a média do país. Um aumento no FC implica no avanço tecnológico das turbinas eólicas.
- Os custos de operação e manutenção podem ser reduzidos, se forem utilizados programas de manutenção preventiva e preditiva eficazes.
- Em relação a tarifa de energia, o valor de R\$ 108,00 por MWh é difícil de ser mudado, pois esse parâmetro é definido pelos leilões de energia e dependem muito da concorrência.
- Em relação aos juros de financiamento, a sua redução é totalmente dependente do apoio governamental às fontes renováveis de energia. Com esses juros menores, projetos como esse estudado fica muito mais atrativo para os empreendedores.

Observa-se ao término dessa análise que o investimento em energias renováveis é mais importante a cada dia, e cabe ao governo brasileiro dar atrativos a esse tipo de investimento.

5. CONCLUSÕES

Com este trabalho, foi possível avaliar o quanto o Brasil tem sido proativo em fontes renováveis, em um país onde a matriz de geração de eletricidade é bastante diversificada, a energia eólica está se destacando pela ótima qualidade dos ventos e pelos fortes investimentos, totalizando uma capacidade instalada de 13 GW.

Nesse cenário, sendo o nordeste o maior pólo brasileiro de geração de energia eólica, Pernambuco, representa uma parcela muito importante. Após a realização desse trabalho, ficou evidente que a instalação do parque eólico no sertão do Araripe é viável apenas se tiver o apoio do poder público, para os parâmetros e características utilizadas nesse estudo. O método de Engenharia Econômica utilizado foi a Taxa Interna de Retorno (TIR) que apresentou o valor de $-6,77\%$, valor esse que quando negativo significa que o empreendedor vai ter prejuízo.

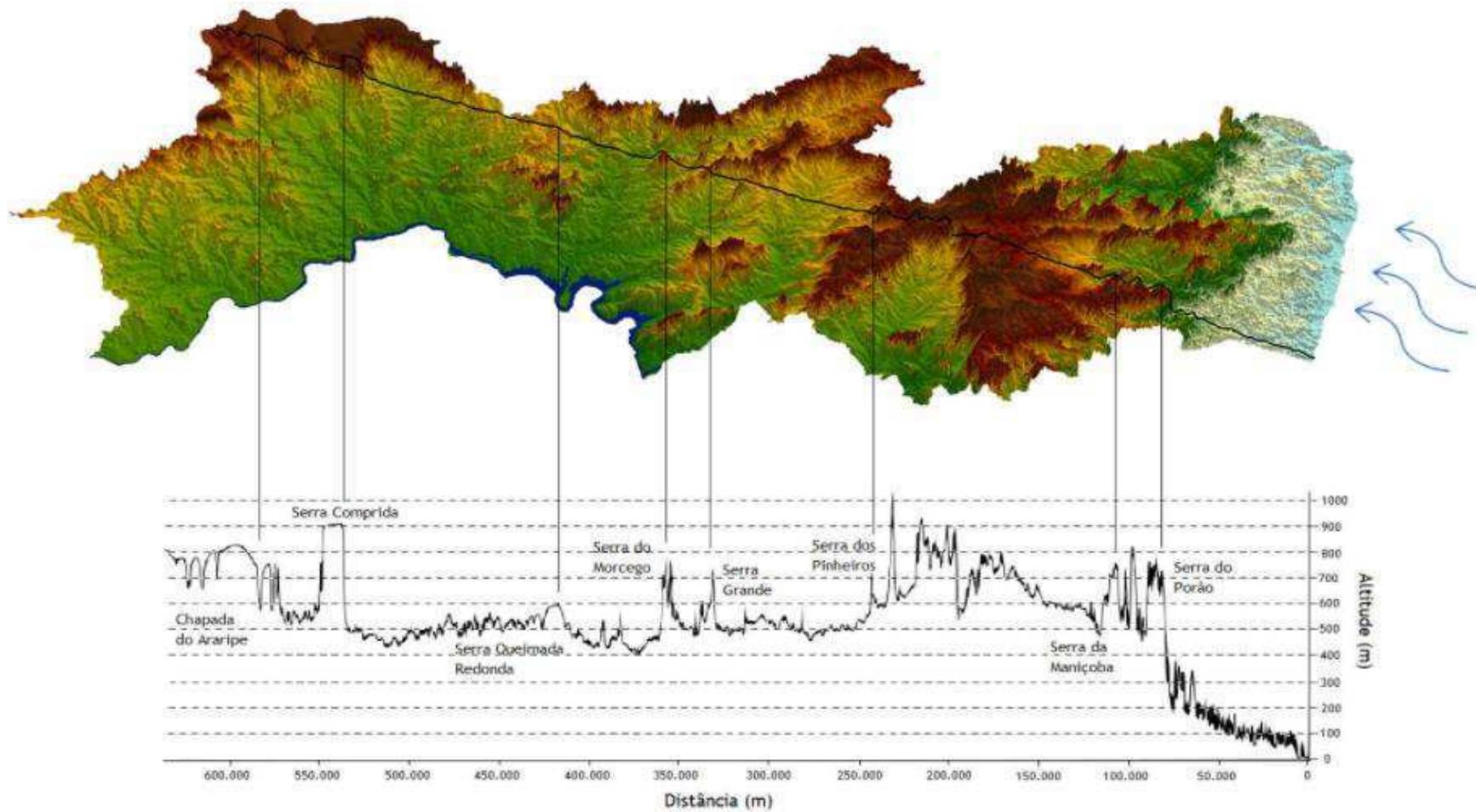
Portanto, o investimento em energias renováveis se torna cada vez mais importante, dia após dia, sendo o Brasil o maior gerador de energia eólica da América Latina, cabe ao governo dar atrativos a esse enorme potencial, como incentivar o desenvolvimento da indústria de aerogeradores, diminuir a taxa de juros do financiamento para que essa porcentagem de energia eólica aumente a cada dia na matriz energética brasileira.

REFERÊNCIAS

- DUTRA, R., “*Princípios e Tecnologia*”. Tutorial de Energia Eólica. CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito) – 2008.
- “*Procedimentos de Distribuição de Energia Eólica no Sistema Elétrico Nacional*”. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Visualizado em fevereiro de 2018. Disponível em: www.aneel.gov.br
- SALVADOR, C. P. “*Influência do perfil de velocidades no funcionamento de um aerogerador*”. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto, Porto. Portugal, 2012.
- SILVA, C. L.; SILVA, M. R. A.; BARBOSA, S. A.; SANTOS, A. K. D.; ROCHA, A. B. F.; “*Implantação de Parque Eólico no Brasil*”. Artigo aceito para publicação no XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Outubro, 2015, p.6.
- JERVELL, T. J. “*Estudo da influência das características do vento no desempenho de aerogeradores*”. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto, Porto. Portugal, 2008.
- SOARES, T. L. “*Planejamento e implantação de um parque eólico*”. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza-CE. Junho de 2010.
- LEITE, P. A.; FALCÃO, M. D.; BORGES, L. T. C.; “*Modelagem de usinas eólicas para estudos de confiabilidade*”. Artigo aceito para publicação na revista Controle & Automação, vol.17, no.2/ Abril, Maio e Junho, 2006.
- MULLER, N. M. “*Projeto de uma turbina eólica de eixo horizontal*”. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro – RJ. Agosto de 2015.
- ILDEU, C. A. V.; JUNIOR, G. C. S.; RODRIGUES, D. K.; PAULA, A. A.; “*Estudo de viabilidade econômica da construção de um parque eólico na região do triângulo mineiro e alto Paranaíba*”. Artigo aceito para publicação no XII CEEL, Outubro, 2014.
- Lei brasileira 8.666 de 21 de junho de 1993. Visualizado em fevereiro de 2018. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/18666cons.htm.
- PORTALBRASIL. “*Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo: IPCA*”. Visualizado em fevereiro de 2018. Disponível em: www.portalbrasil.net/ipca.

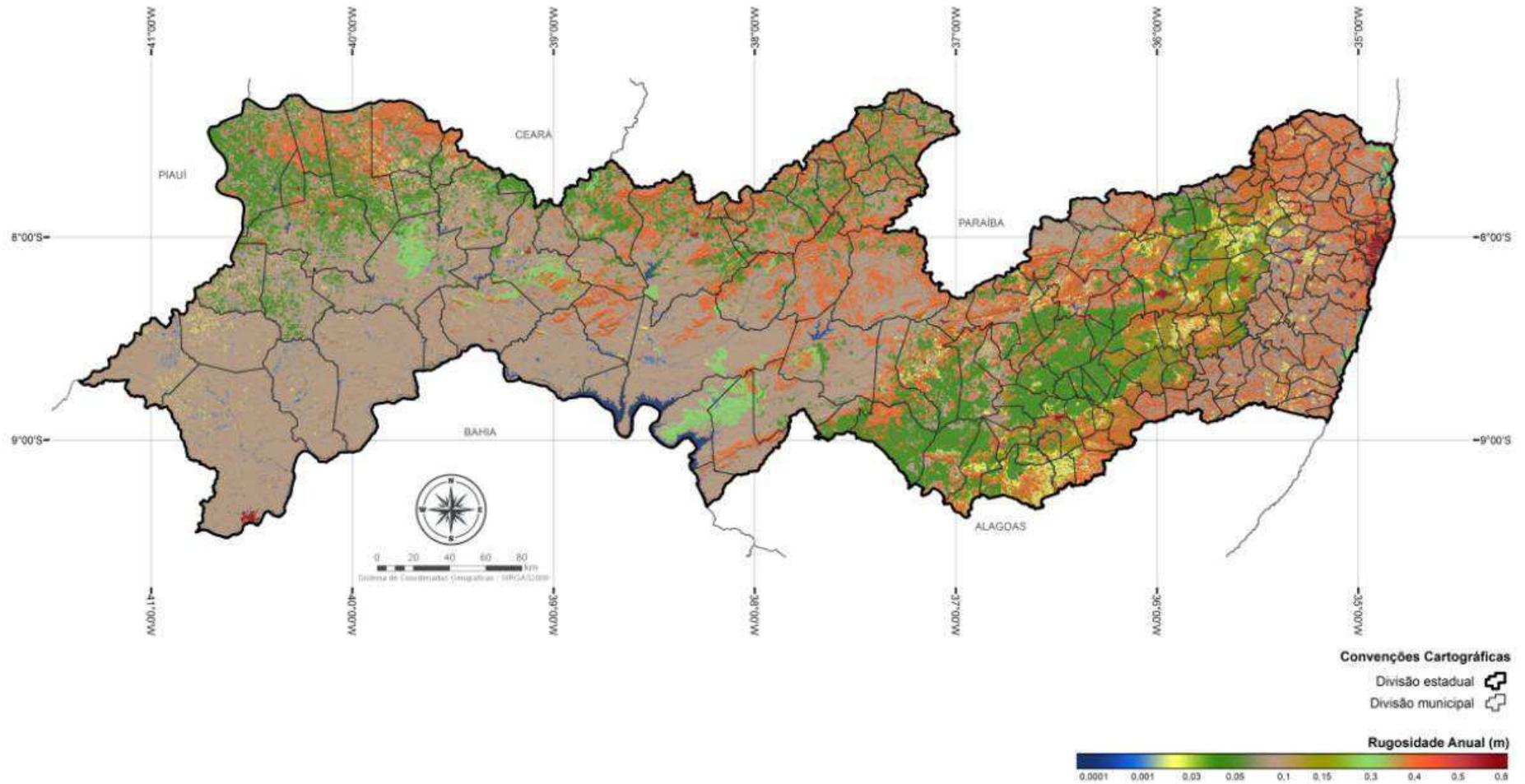
- WEG. “*Transformadores Secos*”. Catálogo de fabricante. Visualizado em fevereiro de 2018. Disponível em: www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Geração,-Transmissão-e-Distribuição/Transformadores-a-Seco.
- BNDES. Banco Nacional de Desenvolvimento. “*Financiamento a Empreendimentos: Energias Alternativas*”. Visualizado em fevereiro de 2018. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-energia>.
- TAVARES, E. “*Energia Eólica: Viabilidade Técnica e Econômico – Financeira*”. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), João Monlevade – MG, 2016.
- SIMIS, A. “*Análise de Viabilidade Econômica de Projetos de Geração Eólica no Brasil*”. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. Dezembro de 2010.
- “*Evolução da Energia Eólica no Brasil*”. ANEEL. Visualizado em fevereiro de 2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>.
- OLIVEIRA, M. L. K. “*Projeto básico de um parque eólico e estudos de conexão*”. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora – RJ, 2014.
- “*PROINFA – Programa de Incentivo às fontes alternativas de Energia Elétrica*”. Ministério de Minas e Energia (MME). Visualizado em janeiro de 2018. Disponível em: <http://eletrobras.com/pt/Paginas/Proinfa.aspx>.
- “*Atlas Eólico e Solar de Pernambuco*”. Governo de Pernambuco. Visualizado em fevereiro de 2018. Disponível em: <http://www.atlaseolicosolar.pe.gov.br/>
- “*ABEEOLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica*”. Visualizado em janeiro de 2018. Disponível em: <http://www.abeeolica.org.br>.
- DUTRA, R. M. “*Energia Eólica – Estado da Arte e Princípios Físicos*”. Apresentação de slides. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) – ELETROBRAS.
- LAPPONI, J. C. *Avaliação de Projetos de Investimentos: Modelos em Excel*, 1996.

Anexo A: Seção transversal da topografia de Pernambuco, na direção predominante do vento (ESE), com destaque para os principais pontos de elevação.



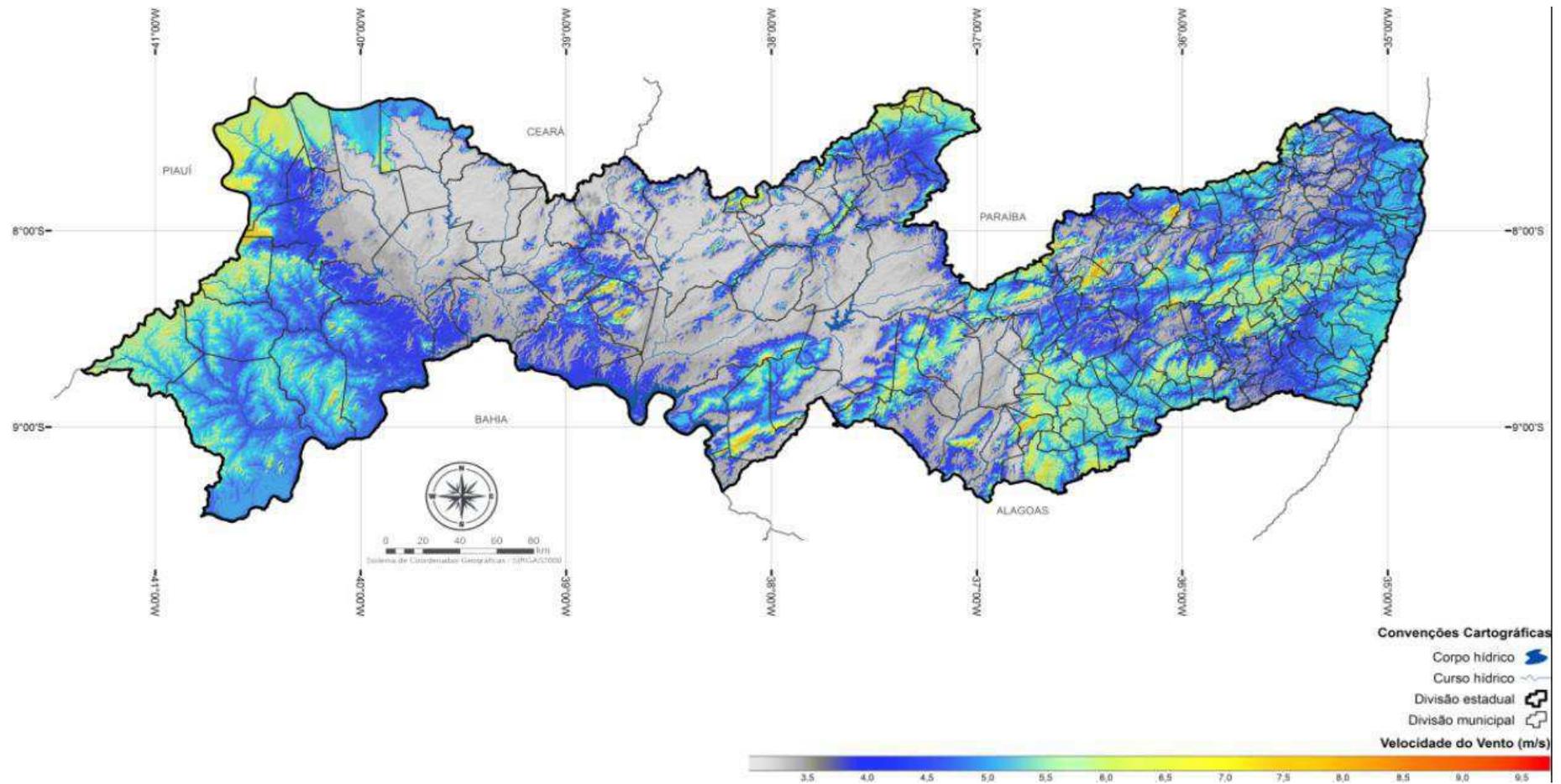
Fonte: TOPODATA/INPE/UFPE/Atlas Eólico de PE (2017).

Anexo B: Modelo Digital de Rugosidade do Estado de Pernambuco.



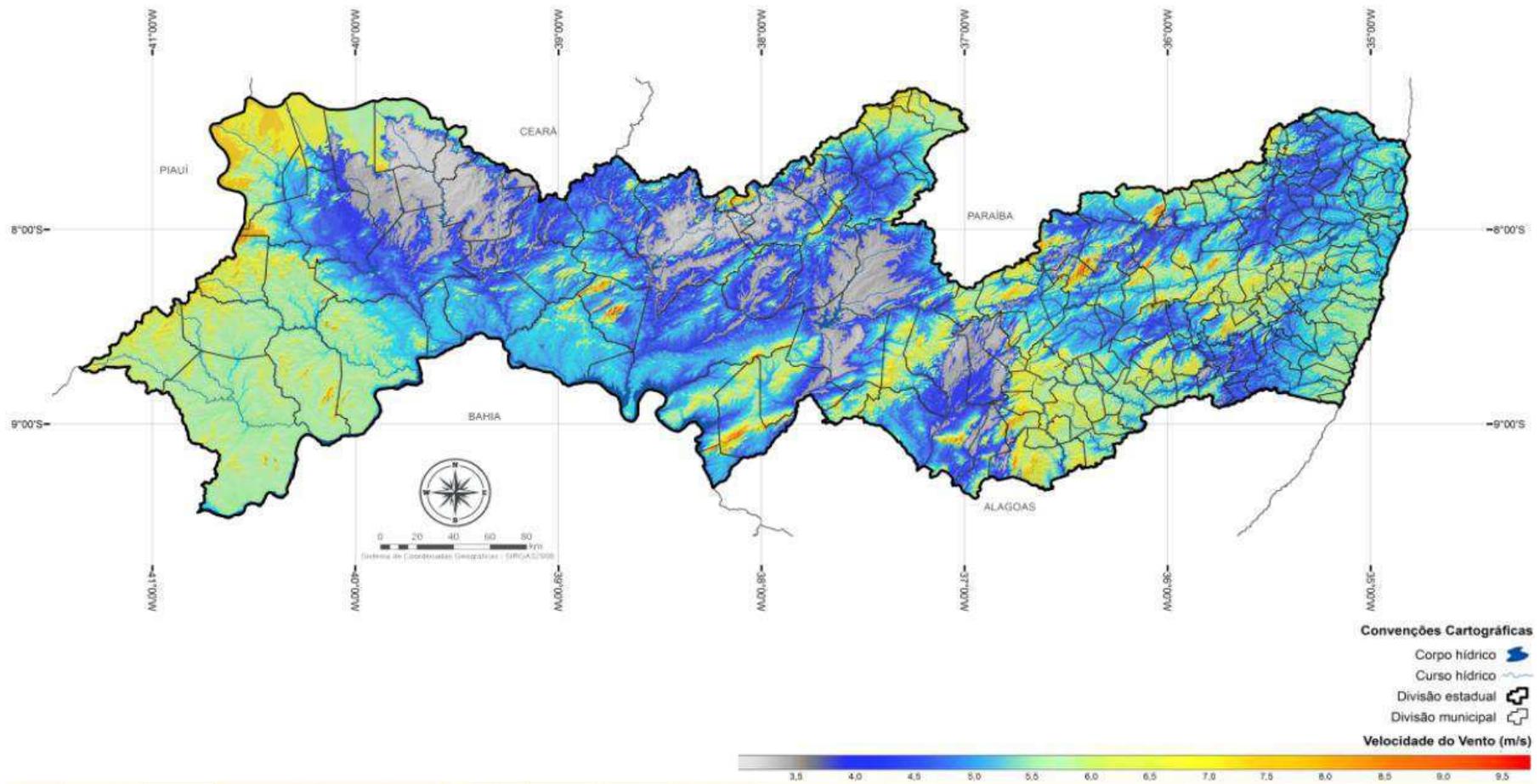
Fonte: Atlas Eólico de Pernambuco (2017).

Anexo C: Velocidade do vento anual a 50m de altura.



Fonte: Atlas Eólico de Pernambuco (2017).

Anexo D: Velocidade do vento anual a 100m de altura.



Fonte: Atlas Eólico de Pernambuco (2017).

