



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



UM ESTUDO SOBRE ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

LUÍZA BASTOS RIBEIRO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

João Monlevade, MG

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



UM ESTUDO SOBRE ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Luíza Bastos Ribeiro

Trabalho de Conclusão de Curso orientado pelo Prof. Dr. Savio Figueira Corrêa, e co-orientado pelo professor Welbert Rodrigues submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia Eletricista.

João Monlevade - MG, 31 de março de 2017

R484u Ribeiro, Luíza Bastos .
Um estudo sobre Energia Eólica no Brasil [manuscrito] / Luíza Bastos
Ribeiro. - 2017.

68f.: il.: color; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Sávio Figueira Corrêa.
Coorientador: Prof. Me. Welbert Rodrigues.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de
Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Energia eólica. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Recursos energéticos.
4. Força eólica. I. Corrêa, Sávio Figueira . II. Rodrigues, Welbert. III.
Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 621.311.245

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



ATA DE DEFESA

Aos 28 dias do mês de março de 2017, às 15:30 horas, no bloco H deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pela aluna Luíza Bastos Ribeiro, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Savio Figueira Corrêa, Welbert Alves Rodrigues, Renan Fernandes Bastos e Cecília Silva Monnerat. A aluna apresentou a monografia intitulada: Um estudo sobre a energia eólica no Brasil. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela aprovação da aluna, com a nota média 9,5, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pela formanda.

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca examinadora	Nota
Savio Figueira Corrêa	10,0
Welbert Alves Rodrigues	9,2
Renan Fernandes Bastos	8,8
Cecília Silva Monnerat	9,8
Média	9,5

João Monlevade, 28 de março de 2017.

Savio Figueira Corrêa
Savio Figueira Corrêa (Orientador)

Welbert Alves Rodrigues
Welbert Alves Rodrigues (Co-orientador)

Renan Fernandes Bastos
Renan Fernandes Bastos (Convidado)

Cecília Silva Monnerat
Cecília Silva Monnerat (Convidada)

Luíza Bastos Ribeiro
Luíza Bastos Ribeiro (Aluna)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado
“ UM ESTUDO SOBRE A ENERGIA EÓLICA NO BRASIL ”
é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto,
material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida
citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 30 de MARÇO de 2017.

LUÍZA BASTOS RIBEIRO

Nome completo do(a) aluno(a)

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais e à minha família por todo o suporte emocional e financeiro, pela torcida, confiança e pelo carinho incondicional. Agradeço também à Universidade Federal de Ouro Preto pela oportunidade de crescimento pessoal e profissional. Ao meu namorado pelo companheirismo, apoio, torcida, carinho e paciência. Aos meus amigos pelo incentivo, pela companhia e pela ajuda em todos os âmbitos. Aos técnicos de laboratório que se puseram à disposição quando necessário. Por fim, gostaria de agradecer ao meu orientador Savio e co-orientador Welbert pela disponibilidade, incentivo e confiança.

Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.

Friedrich Nietzsche

Resumo

Esse trabalho visa realizar um estudo detalhado a respeito da energia eólica no Brasil. Dando maior ênfase aos aspectos econômico e ambiental. Para a decisão da viabilidade da implantação desse tipo de usina, viu-se necessário comparar os dados coletados com os dados das formas de geração mais utilizadas no país. Dessa maneira, escolheu-se por realizar análise comparativa econômica e ambiental das usinas eólicas com as usinas hidrelétrica e termelétrica, todas de grande porte. Ao analisar todos os aspectos econômicos, confirmou-se que as usinas hidrelétricas ainda são mais lucrativas, porém o alto valor de investimento inicial e a dificuldade de encontrar recursos hidrelétricos de fácil acesso, podem dificultar novos empreendimentos. Em relação as eólicas, ocorre justamente o contrário, o baixo valor de investimento inicial, têm tornado esse tipo de usina acessível até para pequenos investidores. Agregando o baixo impacto ambiental às atuais vantagens econômicas, conclui-se que a agregação das fontes eólicas podem ser muito vantajosas se planejadas e analisadas corretamente.

Palavras chave: energia eólica, energia renovável, impacto ambiental, análise econômica, hidrelétricas, termelétricas a carvão.

Abstract

This project aim to do a detailed review of wind generation in Brazil, highlighting the economic and environmental aspects. To decide whether wind farms are viable or not, it was necessary to compare those informations with the most common energy generation in the country. So, it was made an economic and environmental comparative analisys of the wind farms with hydroelectric and coal thermoelectric plants. It was confirmed that the hydroelectric plants are still more profitable. However, the high initial investments and the difficulty of finding easily accessible water resources, can make new ventures harder. In the opposite way, wind farms demand a low initial investment which it has becoming accessible even for small investors. Adding the current economic advantages with the low environmental impact, it can be conclude that the insertion of wind power plants in the electric matrix can be really positive if made the right planning and analisys.

Keywords: wind energy, renewable energy, economic analisys, environmental impact, hydroelectric plants, coal thermoelectric plants.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.	5
Figura 2 – Distribuição anual da frequência da velocidade dos ventos para Natal/RN a 70m	7
Figura 3 – Distribuição de Rayleigh	9
Figura 4 – Curva típica de potência de turbinas eólicas	12
Figura 5 – Potencial eólico estimado para o vento médio anual	16
Figura 6 – Índices eólicos de produção das regiões da Bahia e Litoral Nordeste . .	18
Figura 7 – Matriz Energética Nacional	18
Figura 8 – Participação das diferentes UTEs	19
Figura 9 – Hierarquia dos critérios utilizados para análise	20
Figura 10 – Custo médio em equipamentos Usinas Eólicas	23
Figura 11 – Evolução da Energia Eólica no Brasil	27
Figura 12 – Participação da Energia Eólica nos Estados	27
Figura 13 – Evolução dos Preços da Energia Eólica Contratada nos Leilões	28
Figura 14 – MW Contratados em 2015	32
Figura 15 – Preço Médio (R\$/MWh)	32
Figura 16 – Parques eólicos em operação, expansão contratada para o período 2015-2019 e áreas importantes para aves migratórias	36
Figura 17 – Taxa de Emissão de GEE das UHEs localizadas na bacia Amazônica .	41
Figura 18 – Ocupação do terreno por unidade de potência instalada	44
Figura 19 – Emissão de GEE de várias fontes de geração elétrica do Brasil	57

Lista de tabelas

Tabela 1 – Fator de rugosidade do terreno	11
Tabela 2 – Relação de tamanho e potência instalada	15
Tabela 3 – Potencial Eólico dos Atlas Brasileiros	17
Tabela 4 – Parâmetros para análise econômica de uma usina Eólica	29
Tabela 5 – Parâmetros para análise econômica	30
Tabela 6 – Emissões de $(kg.CO_2)/MWh$ por fonte de geração	40
Tabela 7 – Emissão de gases e material particulado na combustão do carvão mineral	40
Tabela 8 – Dados para cálculo de payback Eólica	53
Tabela 9 – Dados para cálculo de payback UTE	55
Tabela 10 – Dados para cálculo de payback UHE	56

Lista de símbolos

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ACL	Ambiente de Contratação Livre
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
MME	Ministério de Minas e Energia
Proinfra	Programas de Incentivo às Fontes de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
O&M	Operação e Manutenção
OMS	Organização Mundial da Saúde
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social
FC	Fator de Capacidade
LFA	Leilão de Fontes Alternativas
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica
EOL	Usina Eólica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
IDE	Investimento Direto Estrangeiro
ICMS	Imposto sobre circulação de mercadoria

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Objetivos Específicos	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Energia Eólica	4
2.2	O Vento	4
2.3	Curva de Weibull	7
2.4	Energia e Potência Eólica	9
2.4.1	Fator de Capacidade	12
2.5	Turbinas Eólicas	13
2.6	Classificação dos Sistemas Eólicos	14
2.7	Potencial Eólico Brasileiro	15
2.8	Cenário Energético Nacional	18
2.9	Metodologia	20
3	ANÁLISE ECONÔMICA	22
3.1	Análise Econômica de uma Usina Eólica	22
3.1.1	Custo de Investimento	22
3.1.2	Custo de Operação e Manutenção (O&M)	23
3.1.3	Principais Incentivos no Brasil	24
3.1.4	Taxa de crescimento de mercado	26
3.1.5	Payback	28
3.2	Análise Comparativa	29
4	ANÁLISE AMBIENTAL	34
4.1	Análise Ambiental de uma Usina Eólica	34
4.1.1	Impacto Sobre a Fauna	35
4.1.2	Impacto visual	36
4.1.3	Poluição Sonora	37
4.1.4	Efeitos de interferência magnética	38
4.1.5	Uso do Solo	39
4.2	Análise Comparativa	40
5	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS	49

	ANEXOS	53
A	PAYBACK DE UMA USINA EÓLICA	53
B	PAYBACK DE UMA USINA TERMELÉTRICA	55
C	PAYBACK DE UMA USINA HIDRELÉTRICA	56
D	EMISSÃO GEE DE VÁRIAS FONTES DE GERAÇÃO	57

1 Introdução

O primeiro relato de utilização de energia elétrica no Brasil foi em 1879, através de transporte e iluminação públicos (BNDES, 2002). A partir disso, aos poucos outros locais foram aderindo à sua utilização, porém em pequena escala. O consumo de energia no Brasil só se tornou significativo após a Segunda Guerra Mundial pois houve uma rápida industrialização e urbanização do país devido a sua aliança com os Estados Unidos (GUERRA et al., 2014).

As indústrias não só se destacam como as maiores consumidoras de energia do país, mas também estimulam o consumo aos cidadãos, oferecendo maiores oportunidades ocasionando a redução da população rural e migração dos trabalhadores ao setor de serviços. Como consequência, observa-se o aumento da expectativa de vida e saúde, maiores oportunidades educacionais, maiores salários, diminuição das horas de trabalho e crescimento populacional, gerando um maior consumo pessoal de energia (CAMACHO et al., 2012).

Entre 1940 e 1960, o modelo de geração de energia nacional era primordialmente estatal, funcionando muito bem durante bastante tempo, o que permitiu a expansão e a capacidade de suprimento de energia do país. Até que em 1973, com a crise do petróleo e com as dívidas do país aceleradas pela redução do investimento dos Estados Unidos, trouxeram como consequência a redução dos fundos monetários, acarretando em uma diminuição dos investimentos na expansão de oferta de energia por parte do governo (GUERRA et al., 2014).

Após o choque gerado pela crise do petróleo o Brasil teve que tomar algumas decisões para se tornar menos dependente dos combustíveis fósseis e alavancar um desenvolvimento tecnológico e econômico. Para tanto, desde 1990 começaram a ocorrer mudanças significativas no setor de energia do país. Inicialmente, o setor foi reestruturado e as empresas foram privatizadas a fim de atrair mais investimentos e garantir sua expansão. Entre o ano citado e 2003 foram criados a ANEEL, ONS, o CCEE e o CNPE com diversos objetivos como regulamentar, fiscalizar, operar e aumentar a competitividade do mercado de eletricidade. Outras mudanças também foram implementadas, como a criação dos leilões de energia, a criação do ambiente de contratação Regulada (ACR), e o Ambiente de Contratação Livre (ACL), de modo a aumentar a competitividade e garantir a demanda (MME, 2016c). Foi também criada a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME) que atuam em conjunto no planejamento energético integrado brasileiro.

Apesar do Brasil ter a maioria da sua geração de energia baseada em energia renovável, as mudanças incorporadas pelo novo modelo, não havia tornado a indústria nacional mais competitiva (GUERRA et al., 2014). Grande parte do investimento brasileiro vinha sendo focado na geração de energia hidrelétrica, sendo esse tipo de geração responsável por aproximadamente 70% da energia fornecida (EPE, 2015). O que torna matriz energética nacional limitada e os custos de geração altamente dependentes de fatores climáticos. Em épocas de seca, como as vivenciadas nos anos de 2013 e 2014, para compensar a baixa produção das hidrelétricas, as usinas termelétricas e nucleares foram acionadas, elevando os custos de geração além de aumentar as taxas de poluição do país.

Uma solução mais viável é a inserção de outras fontes renováveis na matriz brasileira de forma a torná-la menos vulnerável e de manter as baixas taxas de poluição. Entretanto, o investimento em tais fontes como a eólica e a solar não era viável do ponto de vista privado devido a baixa rentabilidade, pois não existia suporte político, dados confiáveis e não existia tecnologia nacional. Porém, desde 2002, com a criação do Proinfa, que incentiva a utilização de fontes renováveis (principalmente a eólica) esses entraves estão sendo aos poucos erradicados. Tem sido comprovado o excelente potencial eólico do país, principalmente na região Nordeste (MME, 2016b). Dessa maneira, o investimento na geração eólica tem se tornado cada vez mais promissor e atraente.

1.1 Objetivos

Apesar da geração de energia eólica ser um assunto antigo nos ambientes literários e científicos, o interesse na sua utilização é um assunto bem recente, principalmente em países em desenvolvimento como Brasil. Portanto, toda informação relacionada ao tema é de extrema importância no contexto atual. Sendo assim, o principal objetivo desse trabalho é realizar um estudo sobre energia eólica afim de produzir uma fonte de pesquisa para possíveis investidores nesse tipo de geração. Foi decidido por abordar os temas econômico e ambiental de maneira mais detalhada e em seguida realizar a comparação desses critérios com os das usinas hidrelétrica e termelétrica, para que fosse possível mensurar e decidir sobre a viabilidade de implementação das usinas eólicas no Brasil.

1.2 Objetivos Específicos

1. Realizar toda revisão bibliográfica para possível entendimento do assunto;
2. Sintetizar artigos mais relevantes relacionados aos critérios econômicos e ambientais referentes à usina eólica e compará-los aos das usinas hidrelétrica e termelétrica a carvão;

3. Realizar análise crítica do material pesquisado;
4. Propor possíveis melhorias;

2 Revisão Bibliográfica

Nesse capítulo foi realizado todo o estudo teórico necessário para o entendimento do trabalho. Priorizou-se o detalhamento das informações a respeito da geração eólica e também informações como o potencial eólico brasileiro como está a matriz energética hoje.

2.1 Energia Eólica

A energia eólica é a energia existente na movimentação dos ventos, ou seja, é a energia cinética contida nas massas de ar da atmosfera. Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa uma centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo (CRESESB, 2014).

A utilização dessa energia para fins mecânicos, como impulsão de barcos a vela, rotação de moinhos, bombeamento e água ou moagem de grãos, é muito antiga. Em contrapartida, seu uso para obtenção de energia elétrica é bem mais recente, havendo relatos de estudo no século XIX, mas sendo consolidada apenas em 1970, onde se viu necessária devido à crise do petróleo (REIS, 2011).

O aproveitamento da energia eólica em energia elétrica consiste na conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também chamadas de aerogeradores.

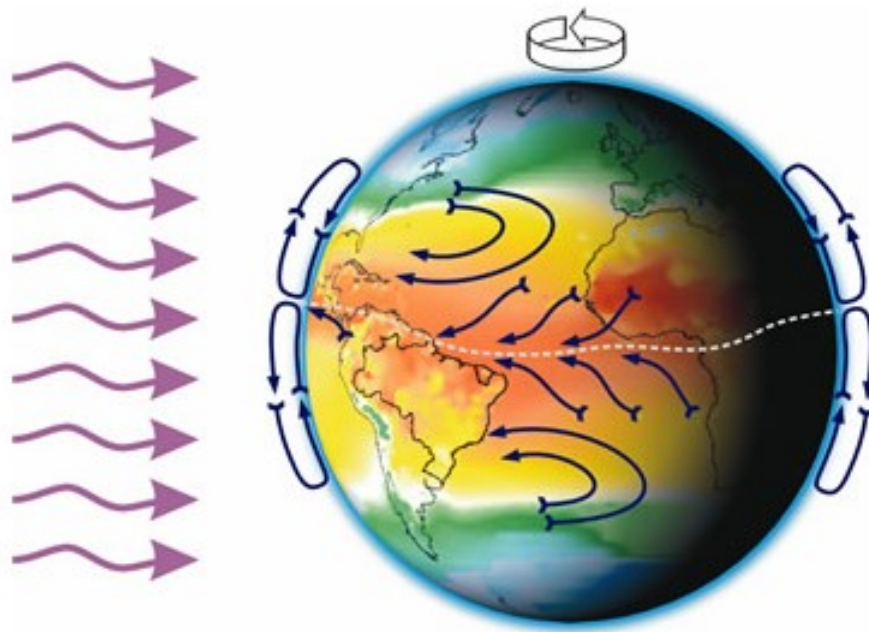
A seguir, serão abordados os conceitos necessários para a compreensão do mecanismo de geração de energia eólica e para o entendimento desse trabalho.

2.2 O Vento

O vento é uma massa de ar em movimento, e essa movimentação é gerada devido a dois principais motivos: O aquecimento diferenciado das camadas de ar pelo Sol (geração de diferentes densidades e gradientes de pressão) e através dos movimentos da Terra (REIS, 2011).

De maneira mais detalhada, sabe-se que o ar é um conjunto de gases, e por isso, está sujeito à todas as características físicas desses fluidos. Sendo assim, o ar quente se expande mais que o frio, tornando-se menos denso e tendendo a subir e sendo substituído pelo ar frio que é mais denso. Desta maneira, como o Sol transfere maior energia para aquelas regiões em que seus raios solares são perpendiculares ou próximas a esse ângulo, sabe-se que no trópico do Equador (local cujo ângulo de ataque solar é 90°), a temperatura é bem maior que nos polos. Portanto, o vento é principalmente gerado pelo maior aquecimento da superfície da Terra perto do Equador do que perto dos polos. Isto faz com que os ventos das superfícies frias circulem dos polos para o Equador para substituir o ar quente que sobe nos trópicos e se move pela atmosfera superior até os polos, fechando o ciclo. Conforme a Figura 1 (CRESESB, 2014).

Figura 1 – Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.



Fonte: (CRESESB, 2014)

Devido à inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao Sol, ao longo da sua translação, a Terra se expõe de maneiras diferentes a ele, gerando assim as estações do ano (variações sazonais) (UFPR, 2009). Conseqüentemente, são geradas variações sazonais na intensidade e duração dos ventos em qualquer local da superfície terrestre, gerando os ventos continentais que compreendem as monções e as brisas. As monções são ventos periódicos que mudam de sentido a cada estação do ano. Já as brisas estão diretamente relacionadas ao tipo de terreno (tais como mares e continentes) e à maneira como ele reage ao calor recebido pelo Sol (capacidade de armazenamento, reflexão e absorção de calor), se caracterizando por serem ventos periódicos que sopram do mar para o continente e

vice-versa. Em regiões montanhosas também há a geração de ventos locais, que têm uma característica bem típica resultada das condições locais.

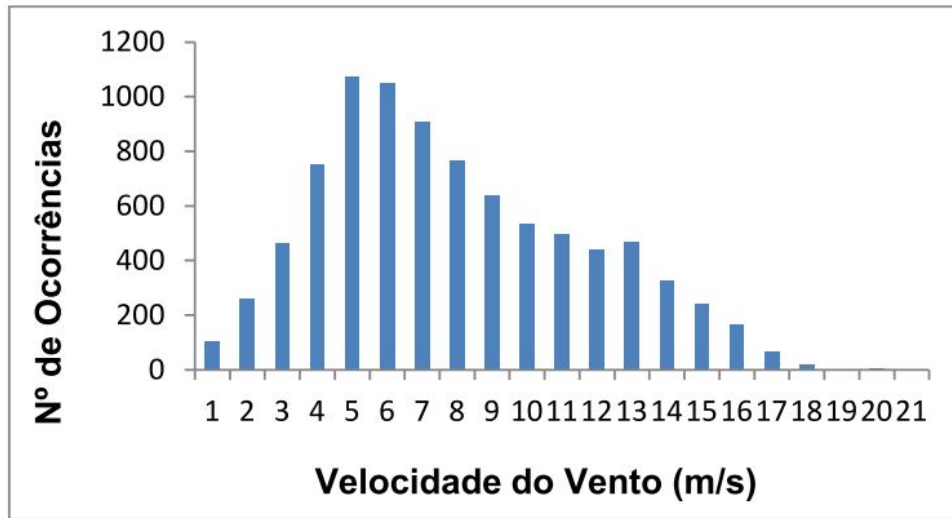
Além do seu comportamento ser regido pelas suas formas de geração, o vento também é influenciado por outros aspectos naturais, tais como: Latitude, altitude, características topográficas e rugosidade do solo (CAMPOS, 2004).

Percebe-se, desta forma, que a velocidade do vento é extremamente sensível a diversos fatores, fazendo com que a potência extraída do mesmo varie proporcionalmente. Sendo assim, para a construção de uma usina eólica, todo um estudo de terreno e localização, assim como o levantamento de dados através de medições e de outras pesquisas realizadas no local são necessários, para que ao final, seja possível realizar um correto dimensionamento da usina, visto que qualquer falha pode acarretar em erros de estimativa de produção de energia, gerando prejuízos financeiros ao proprietário do projeto.

O levantamento do comportamento dos ventos, como direção e intensidade, normalmente é realizado através de anemômetros instalados a 10m do solo, sensores de direção e do tratamento estatístico adequado dos dados. Esses resultados são normalmente representados em mapas cartográficos, com isolinhas de velocidade média, isolinhas de calmaria, isolinhas de velocidade máxima e isolinhas de fluxo de potência média ou potência média bruta (w/m^2) (REIS, 2011).

A curva de maior relevância e a partir da qual todas as outras podem ser obtidas é a da frequência das velocidades, que fornece o período de tempo em que uma determinada velocidade foi observada. Como exemplo, o gráfico da Figura 2, retirado de Tuchtenhagen, Basso e Yamasaki (2014) mostra a distribuição de velocidades do vento em Natal/Rio Grande no Norte. Os dados foram medidos desde às 00:00UTC do dia 01/01/2011 às 24:00UTC do dia 01/12/2011, utilizando um passo de tempo de 75 segundos a um nível de altura de 70m.

Figura 2 – Distribuição anual da frequência da velocidade dos ventos para Natal/RN a 70m



Fonte: (TUCHTENHAGEN; BASSO; YAMASAKI, 2014)

Percebe-se da Figura 2 que o maior número de ocorrências está entre $5m/s$ e $7m/s$ e que mais de 55% das velocidades registradas são maiores que $7m/s$.

Outro dado importante a ser registrado é velocidade média, pois com as duas informações pode-se projetar, de maneira correta, as velocidades de partida e de corte do aerogerador (REIS, 2011).

2.3 Curva de Weibull

A determinação correta do regime dos ventos é essencial no dimensionamento de um sistema eólico, e este se faz utilizando-se a curva de frequência de velocidade do mesmo. Entretanto, para a realização de uma pesquisa confiável, necessita-se de um volume de dados muito extenso, ou seja, deve-se coletar essas velocidades por um longo período de tempo (normalmente por vários anos com registro a cada dez minutos). Muitas vezes, trabalhar com um grande volume de dados se torna inviável (TROEN; PETERSEN, 1989).

Como solução, utilizam-se modelos probabilísticos para modelar as curvas de frequência de velocidades, pois os mesmos reproduzem estatisticamente os dados analisados de maneira compacta. Dentre as existentes, a distribuição de Weibull é muito utilizada na análise do aproveitamento de energia eólica. Sua utilização é mais recorrente pois ela consegue retratar, de maneira satisfatória, uma grande variedade dos padrões de comportamento do vento além de incluir o comportamento de ventos extremos (SANSIGOLO,

2005) .

O gráfico de Weibull é, em termos estatísticos, a distribuição de densidade de probabilidade do vento. Ou seja, a probabilidade $f(v)$ do vento soprar a uma determinada velocidade v compreendida no intervalo considerado no gráfico. Esta função é calculada de acordo com a equação 2.1

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c}\right)^k \right] \begin{cases} k > 0 \\ c > 1 \\ v \geq 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

onde,

c - Fator de escalas em unidades de velocidade do vento

k - Fator de forma adimensional

v - Variável aleatória de velocidade do vento

O fator de forma k está inversamente relacionado à variância σ^2 das velocidades eólicas em torno da média. Portanto, para a definição do gráfico de Weibull, necessita-se das informações de velocidade média 2.2 e desvio padrão 2.3 do vento.

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (2.2)$$

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (v - \bar{v})^2 f(v) dv \quad (2.3)$$

Existem diversos métodos para a determinação dos parâmetros c e k , um deles testado e considerado mais preciso por Araújo (1989) foi o Método da Velocidade Média e Desvio Padrão, no qual:

$$k = (\sigma/\bar{v})^{-1,086} \quad (2.4)$$

$$c = (\bar{v})/\Gamma(1 + (1/k)) \quad (2.5)$$

onde,

$\Gamma(x)$ = Função Gamma, que é calculada pela equação 2.6

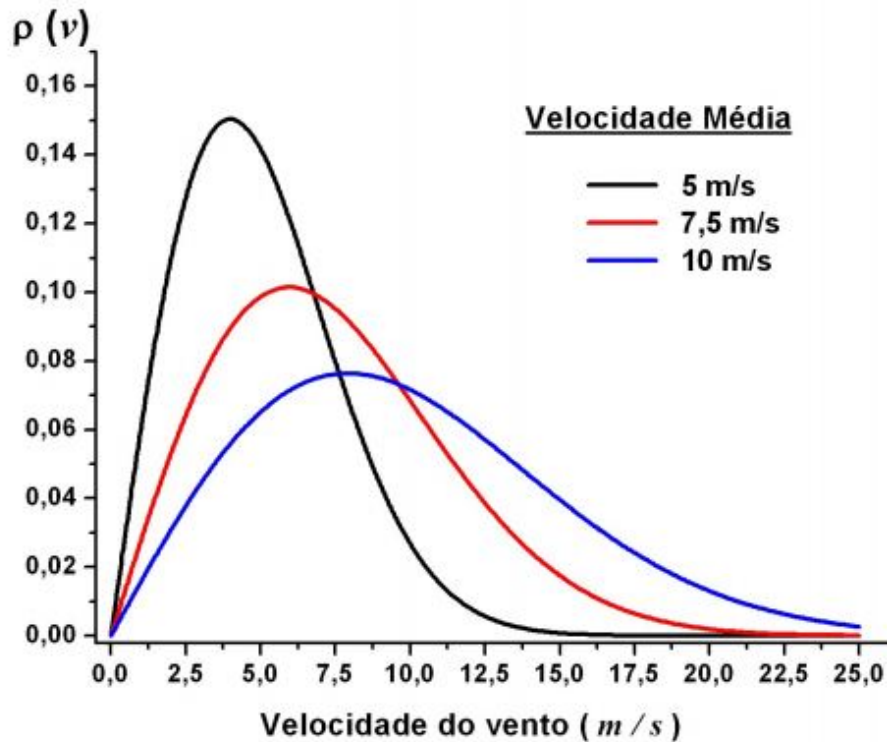
$$\Gamma(x) = \int_0^1 \left[\ln \left(\frac{1}{t} \right) \right]^{(x-1)} dt \quad (2.6)$$

onde neste caso: $x = (1 + 1/k)$

Quando o valor de $k = 2$, gera-se uma outra curva, mais simplificada, denominada Distribuição de Rayleigh, também utilizada em engenharia eólica.

A figura 3 mostra a distribuição de Rayleigh para diferentes velocidades médias do vento.

Figura 3 – Distribuição de Rayleigh



Fonte: (CARNEIRO, 2014)

2.4 Energia e Potência Eólica

A energia disponível para uma turbina eólica é a energia cinética associada a uma coluna de ar que se desloca a uma velocidade $v(m/s)$, atravessando uma área $A (m^2)$ do rotor da turbina e deslocando uma massa $\rho Av(kg/s)$, em que $\rho(kg/m^3)$ é a massa específica do ar. A potência disponível do vento $P_d(W)$, pode então ser calculada pela Equação 2.7 (CAMPOS, 2004):

$$P_d = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.7)$$

Dessa Equação, pode-se compreender que a potência obtida de uma massa de ar é proporcional à três fatores:

- À área de captação do vento pela turbina, ou seja, a área varrida pela hélice de raio r ($A = \pi r^2$);
- À densidade do ar local (ρ);
- Ao cubo da velocidade (v^3);

Nota-se também que a variável de maior influência é a velocidade do vento, devido a sua característica polinomial, ou seja, qualquer mínima alteração de v , a potência sofre variação cúbica.

Para facilitar a comparação de potências eólicas a diferentes velocidades e em diferentes locais, costuma-se considerar a potência por unidade de área (Pd/A). Esse termo é definido como fluxo de potência eólica ou potência média bruta (w/m^2), que é proporcional à área dos coletores (rotor) dos aerogeradores (REIS, 2011).

Um outro fator de influência na velocidade vento é a altura da torre, de acordo com a equação 2.8, quanto mais alta estiver localizada a turbina, maior a velocidade do vento, e portanto, mais potência ela será capaz de extrair. Entretanto, existem limitações mecânicas quanto à altura da torre. Atualmente ela varia em torno de 50 e 140m.

$$v = v_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^n \quad (2.8)$$

Onde,

v - Velocidade do vento

v_0 - Velocidade do vento disponível na altura conhecida

h - Altura desejada

h_0 - Altura conhecida

n - Fator de Rugosidade do Terreno, que varia de acordo com a Tabela 1

De toda a potência gerada pelos ventos, apenas uma parte é convertida em energia elétrica, e essa porção a ser transformada depende de alguns fatores como: a eficiência teórica de Betz (η_B), que pode ser definida como a porcentagem do vento de fato aproveitada pela turbina, o rendimento aerodinâmico (η_A), o rendimento do multiplicador de velocidades (η_M), o rendimento do rotor (η_r) e o rendimento do gerador (η_G). Os valores de rendimento η_r e η_G são fornecidos pelo fabricante do rotor e do gerador.

A soma dos coeficientes $\eta_B + \eta_A$, é denominada coeficiente aerodinâmico de potência do rotor (C_P)_c. Esse Coeficiente exprime a porcentagem de fato aproveitada no eixo

Tabela 1 – Fator de rugosidade do terreno

Descrição do Terreno	n
Terreno sem vegetação	0,1
Terreno gramado	0,12
Terreno cultivado	0,19
Terreno com poucas árvores	0,23
Terreno com muitas árvores, cerca viva ou poucas edificações	0,26
Florestas	0,28
Zonas urbanas sem edifícios altos	0,32

Fonte: (REIS, 2011)

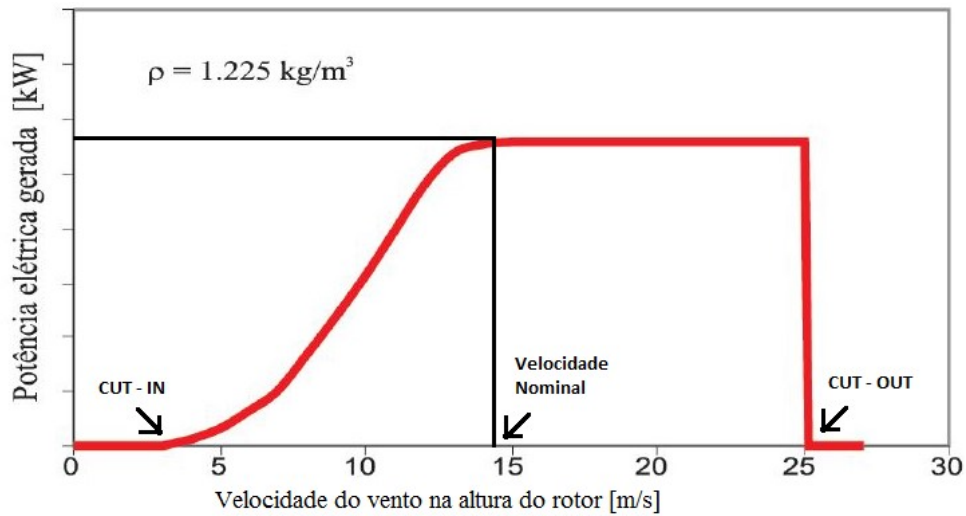
do rotor. Considerando todos os outros fatores como um só, denominado eficiência do conjunto gerador/transmissão tem-se que $\eta = \eta_M * \eta_r * \eta_G$. Sendo assim, substituindo, todos esses fatores à equação 2.7, é obtida a potência elétrica disponível:

$$P_{el} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_P \eta \quad (2.9)$$

Segundo Reis (2011), considerando todos os fatores de eficiência, a eficiência de conversão de energia eólica em energia elétrica gira em torno de 30%.

A Figura 4 mostra a forma típica de curva de potência de turbinas eólicas. A partir dela, pode-se perceber que a velocidade mínima inicial para a geração de energia elétrica (cut-in) geralmente é da ordem de 2,5 a 3m/s. Abaixo desses valores, o conteúdo energético do vento não justifica o aproveitamento. Velocidades superiores a aproximadamente 12m/s a 15m/s ativam o sistema automático de limitação de potência da máquina, que pode ser por controle de ângulo de passo das pás ou por estol aerodinâmico, dependendo do modelo da turbina. A velocidade nominal é escolhida em termos da velocidade média do local, sendo assim, qualquer valor acima dessa velocidade, não será convertido em potência. Sabe-se também que em ventos muito fortes ($v > 25m/s$, de acordo com essa imagem), atua o sistema automático de proteção (cut-out) e o sistema para de gerar(CEPEL, 2001).

Figura 4 – Curva típica de potência de turbinas eólicas



Fonte: (CEPEL, 2001)

A produção anual de energia pode ser calculada pela Equação 2.10

$$E_G = P_I * FC * 8760h/ano \quad (2.10)$$

Onde,

E_G - Energia anual gerada

P_I - Potência Instalada

FC - Fator de Capacidade

2.4.1 Fator de Capacidade

O fator de capacidade é a proporção entre a potência instalada e a produção efetiva naquele instante. Quanto mais próximo de um for esse fator, melhor será o aproveitamento da energia gerada. Por exemplo, um local cuja a velocidade média eólica é de $10m/s$, considerando uma situação ideal, terá sua capacidade instalada de $1kW$. Se, em um primeiro caso hipotético, o local tiver uma velocidade de $20m/s$ até metade do dia e o resto do dia não houver vento, o fator de capacidade seria de 0,5 o que não é positivo, pois na metade do dia em que o vento é de $20m/s$ será gerado apenas $1kW$ sendo que poderia ser gerado oito vezes mais e na outra metade do dia não haveria geração. Em um segundo caso, se ventasse a $10m/s$ o dia inteiro, o fator de capacidade seria unitário não havendo “desperdício” de energia e tendo uma geração constante (CAMPOS, 2004).

O fator de capacidade para o caso de geração eólica é tipicamente bem mais baixo que o de usinas térmicas ou hidrelétricas, ratificando ainda mais a sensibilidade dessa forma

de geração às contingências meteorológicas (REIS, 2011).

2.5 Turbinas Eólicas

As turbinas eólicas modernas podem ser classificadas quanto à orientação do rotor em relação ao solo (verticais ou horizontais). Os rotores de eixo horizontal do tipo hélice com três pás são os mais utilizados para o caso de geração de energia elétrica, pois possuem eficiências superiores aos demais modelos (REIS, 2011).

Devido a velocidade variável do vento, a turbina eólica é incapaz de transformar a energia do vento em energia mecânica mantendo a rotação do eixo constante. Dessa maneira, torna-se necessária a construção de um grupo gerador eólico-elétrico que seja capaz de gerar energia elétrica e entregar para a rede com frequência constante.

Abaixo serão descritos de maneira sucinta, todos os componentes básicos de uma turbina de eixo horizontal.

- Pás do Rotor - Responsáveis por captar a potência do vento e a transmitir para o eixo do rotor. Sabe-se que a velocidade angular do rotor é inversamente proporcional ao raio das pás (Uma fórmula prática para a avaliação da rotação nominal de operação de uma turbina é: $\text{rpm} = 1150/D$), sendo assim, a tendência é que sejam fabricadas pás com raios cada vez maiores. Os rotores no mercado atual variam entre 40 e 80m (CEPEL, 2001);
- Anemômetro - Mede a velocidade e a intensidade do vento. A medição normalmente é realizada a cada dez minutos, e esses dados são utilizados para controle (REIS, 2011);
- Biruta - É um sensor de direção, também utilizada para fins de controle (RUNCOS et al., 2010);
- Rotor - Compreende basicamente as pás - três por aerogerador (tipo comercial de grande porte mais comum) e o cubo onde são fixadas (RUNCOS et al., 2010);
- Nacele - É a carcaça montada sobre a torre, onde se situam o gerador, a caixa de engrenagens (quando utilizada), todo o sistema de controle, medição do vento e motores para rotação do sistema para o melhor posicionamento em relação ao vento (CRESESB, 2014);

- Caixa de multiplicação - Responsável pelo aumento da velocidade de rotação do eixo de baixa velocidade. Esse dispositivo é necessário pois o rotor, gira a uma velocidade muito baixa (na faixa de 20 a 150 rpm), e os geradores (principalmente os geradores síncronos) trabalham em rotações muito mais elevadas (em geral, entre 1200 a 1800 rpm) (CRESESB, 2014);
- Gerador - Realiza a conversão da energia mecânica em energia elétrica. O tipo de gerador utilizado varia de acordo com a aplicação, no caso da geração eólica, encontram-se algumas dificuldades devido a alta variabilidade do torque de entrada e a necessidade de manter a frequência e a tensão constantes além das dificuldades de instalação, operação e manutenção devido ao isolamento geográfico de tais sistemas. Porém, atualmente existem alternativas de conjuntos moto geradores, cada um com vantagens e desvantagens que devem ser analisadas de acordo com a situação. Alguns deles são: geradores de corrente contínua, geradores síncronos e geradores de comutador e corrente alternada (CRESESB, 2014);
- Mecanismo de Controle - Responsável pela orientação do rotor, controle de velocidade, controle de carga, etc. Pela diversa gama de aplicação, os mecanismos de controle podem ser mecânicos (velocidade, passo, freio), aerodinâmico (posicionamento do rotor) ou eletrônico (controle de carga)(CRESESB, 2014);
- Freios - É utilizado como uma forma mecânica de reduzir a rotação das pás. O sistema de freios trabalha em sincronia com os mecanismos de controle eletrônico, sendo acionado quando a velocidade de rotação das pás atinge níveis potencialmente perigosos à estrutura (RUNCOS et al., 2010);
- Torre - É a estrutura projetada para sustentar a turbina com todos os seus componentes. As torres podem ser de concreto, metálicas (de aço) ou híbridas (com uma parte de concreto e outra de aço), e podem ser de três tipos: treliçadas, tubulares estaiadas e tubulares livres (RUNCOS et al., 2010);

2.6 Classificação dos Sistemas Eólicos

Os sistemas eólicos podem ser classificados de acordo com as seguintes categorias:

1. Classificação por potência instalada (potência nominal):

Tabela 2 – Relação de tamanho e potência instalada

Tamanho	Potência Instalada (kW)
Pequeno	Até 80
Médio	de 81 a 500
Grande	> 500

Fonte: (REIS, 2011)

2. Classificação quanto as suas aplicações:

- Sistemas Isolados ou Independentes - São sistemas que operam isolados da rede elétrica, ou seja, não estão no Sistema Interligado Nacional (SIN), eles são de pequeno porte e possuem um maior custo, devido à necessidade de um sistema de armazenamento .
- Sistemas Híbridos - Nesse caso o sistema eólico trabalharia em paralelo com outros sistemas de geração, como geradores a diesel e painéis fotovoltaicos. Esse tipo de sistema pode possuir pequeno ou médio porte.
- Sistemas Interligados a Rede Elétrica - São sistemas que podem ser diretamente ligados à rede de distribuição por meio dos geradores síncronos ou assíncronos ou ligados indiretamente à rede por meio de inversores acoplados ao gerador de corrente contínua.

3. Classificação quanto ao local de construção

Uma usina eólica também pode ser construída tanto em terra quanto ao longo da costa marítima, a esses dois tipos de configuração são denominados respectivamente como Usina Eólica *Onshore* e Energia Eólica *Offshore*.

2.7 Potencial Eólico Brasileiro

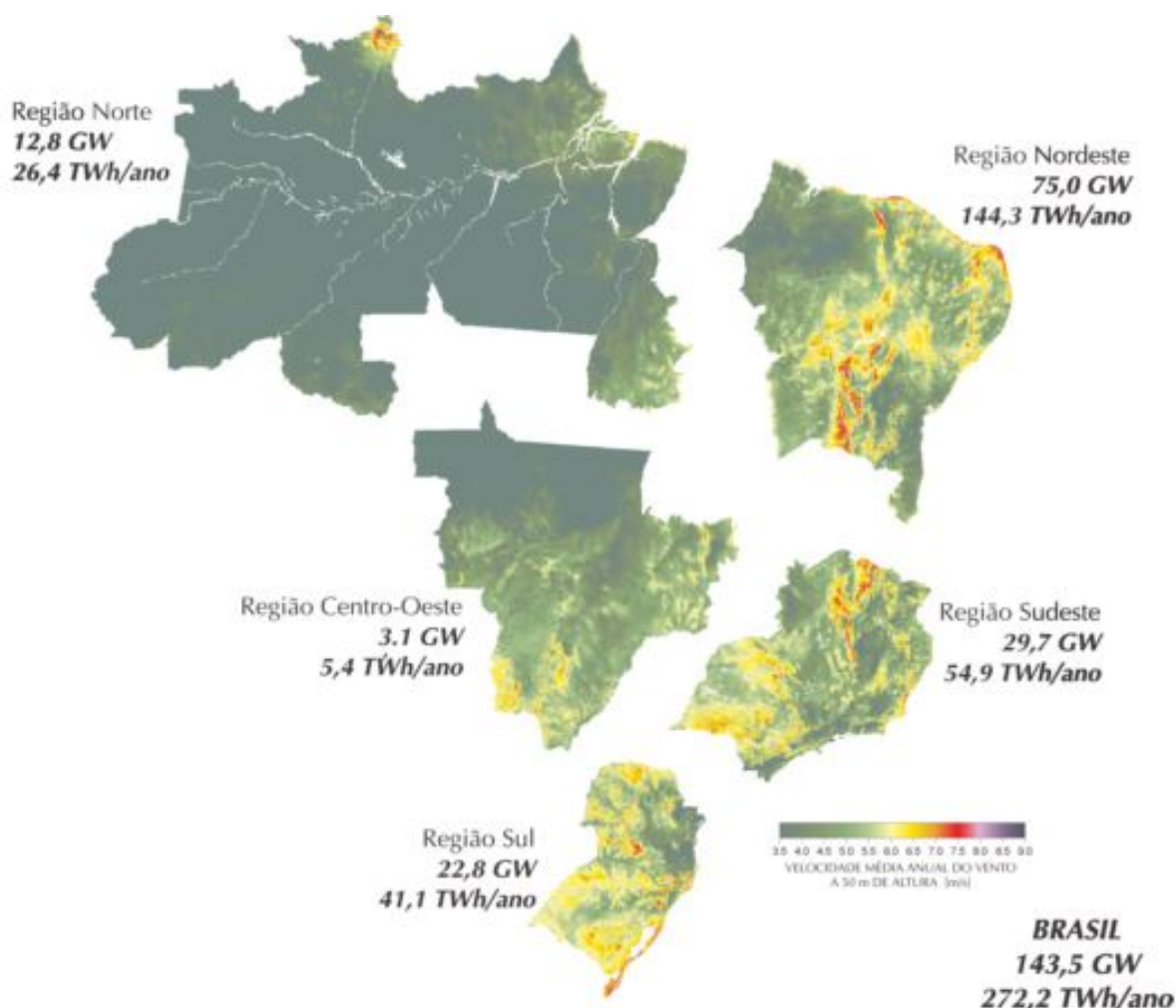
A medição exata de uma área extensa a partir da instalação de instrumentos é muito custosa. Principalmente quando não se tem certeza se o potencial eólico do local será suficiente ou não para a instalação de uma usina. De maneira a reduzir o investimento, utilizam-se algumas fontes de dados que fornecem informações mais gerais, mas podem dar uma boa indicação do potencial eólico do local de interesse e indicar se é viável realizar medições mais precisas. Uma das formas de se identificar o potencial preliminar das áreas de interesse envolve a utilização de mapas ou atlas eólicos (FADIGAS, 2011).

Para a elaboração do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro disponível em CEPEL (2001), utilizou-se de um abrangente sistema de software de modelamento dos ventos de superfície

denominado MesoMap. As simulações foram realizadas levando em consideração diversos fatores como relevo, rugosidade induzida por classes de vegetação e uso do solo, interações térmicas entre a superfície terrestre e a atmosfera. Nesse mesmo Atlas também são disponibilizadas as informações dos parâmetros necessários para a construção da curva de Weibull para cada região.

A Figura 5 ilustra o potencial eólico-elétrico estimado das regiões brasileiras. Quanto mais próximas de violeta as cores são, maiores são as velocidades do vento naquela região. Nota-se que a região Nordeste e Sul são as regiões que possuem maiores potenciais, totalizando quase 70% do potencial total estimado do Brasil inteiro, que é de 143 GW.

Figura 5 – Potencial eólico estimado para o vento médio anual



Fonte: (CEPEL, 2001)

Apesar do Atlas Brasileiro ser de grande confiabilidade e ser um bom material de estimativa do potencial eólico, uma das principais consultorias internacionais na área de energia eólica, o DEWI, estima que o potencial eólico em 2015 no Brasil é de 500 GW,

considerando os últimos desenvolvimentos tecnológicos (excluindo-se o potencial *offshore*). Entende-se pela reportagem, que o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, estima de maneira correta a intensidade do vento, porém devido ao crescimento do setor eólico no país e aos avanços tecnológicos, hoje pode-se considerar que o potencial do país é de aproximadamente 4 vezes maior que o de 2001 (Portal Fator Brasil, 2015).

De uma maneira mais realista, a Tabela 3, mostra resumidamente apenas os potenciais em terra dos atlas regionais existentes, considerando novas tecnologias e a energia captada a alturas superiores a 50m. Ressalta-se que cada informação possui seu conjunto de restrições, modelos e premissas, refletindo o potencial à sua época de edição.

Tabela 3 – Potencial Eólico dos Atlas Brasileiros

Altura	75m(*80m, **70m)		100m		150m	
Estados Potencial (>7m/s)	Potência Instalável (MW)	Energia Anual (GWh)	Potência Instalável (MW)	Energia Anual (GWh)	Potência Instalável (MW)	Energia Anual (GWh)
Alagoas	336	822	649	1.340	n.d.	n.d.
Bahia	38.600*	150.400*	70.100	273.500	195.200	766.500
Ceará	24.900**	51.900**	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Espírito Santo	448	1.073	1.143	2.397	n.d.	n.d.
Minas Gerais	24.742	57.812	39.043	92.076	n.d.	n.d.
Paraná	1.363	3.756	3.375	9.386	n.d.	n.d.
Rio de Janeiro	1.524	4.835	2.813	8.872	n.d.	n.d.
Rio Grande do Norte	19.431	55.901	27.080	69.293	n.d.	n.d.
Rio Grande do Sul	n.d.	n.d.	102.800	382.000	245.300	911.000
São Paulo	15	48	564	1.753	n.d.	n.d.
Total do Atlas	111.023	325.725	246.918	839.277	440.500	1.677.500

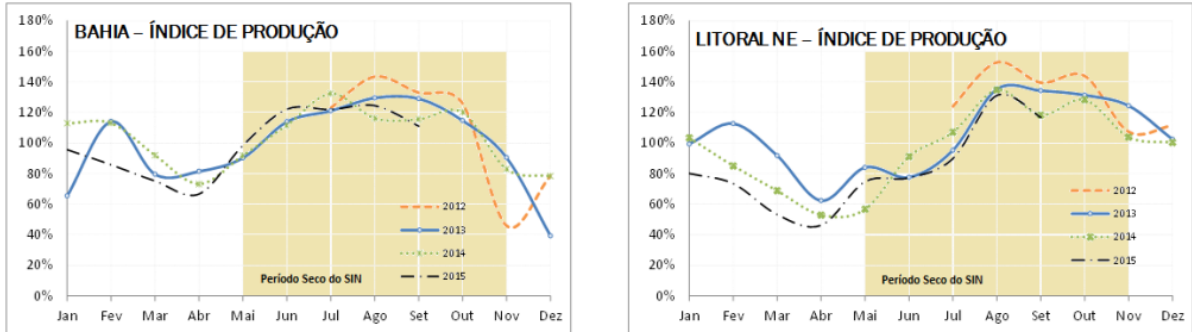
Fonte: (TOMALSQUIN, 2016a)

Apesar do grande potencial eólico brasileiro, esta fonte apresenta um comportamento intermitente, significando uma grande variabilidade da potência gerada ao longo do dia ou de um mês por exemplo. Fato que dificulta a previsão, gerando preocupações do ponto de vista do Sistema Interligado Nacional (SIN) e do Órgão Nacional do Sistema (ONS), pois deve-se saber com certa antecedência quais usinas serão despachadas, além da obrigatoriedade de manutenção dos padrões de qualidade do despacho da energia e da necessidade de usinas de reserva, caso haja período de seca e baixa geração eólica.

Sabe-se que, devido ao seu comportamento, uma usina eólica não pode operar sozinha. Entretanto, sua participação maior no SIN, reduziria o esvaziamento das reservas de água das usinas hidrelétricas, diminuindo o acionamento das termelétricas. Além do mais, apesar do pequeno histórico disponível do comportamento dos ventos das bacias eólicas brasileiras, a bacia do nordeste já apresenta um padrão de complementariedade com a geração hidráulica no período considerado seco para o SIN (maio - novembro). A Figura 6

ilustra o comportamento explicado anteriormente, a partir dos índices eólicos publicados trimestralmente pela EPE (TOMALSQUIN, 2016a).

Figura 6 – Índices eólicos de produção das regiões da Bahia e Litoral Nordeste

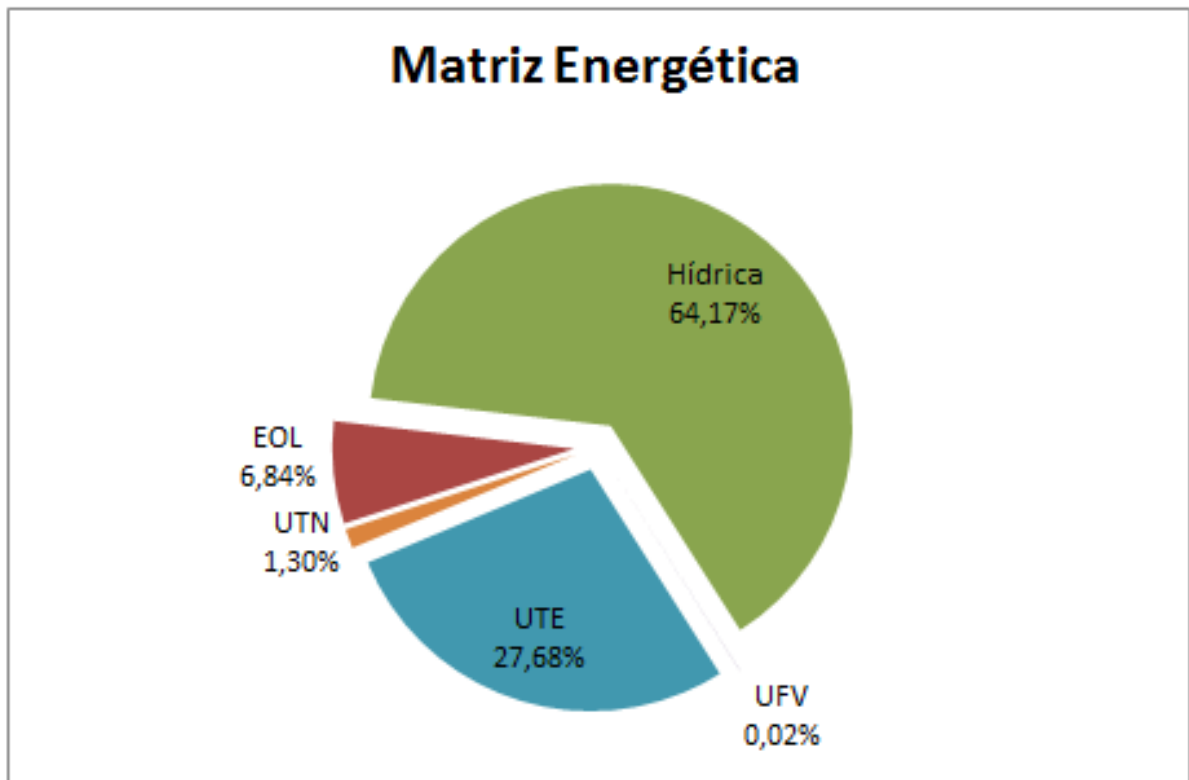


Fonte: (TOMALSQUIN, 2016a)

2.8 Cenário Energético Nacional

Segundo ANEEL (2016), a capacidade instalada e em operação no país, incluindo a parcela de energia importada, totaliza cerca 151.529 MW em 2017, sendo a participação de cada fonte energética dividida de acordo com a Figura 7.

Figura 7 – Matriz Energética Nacional



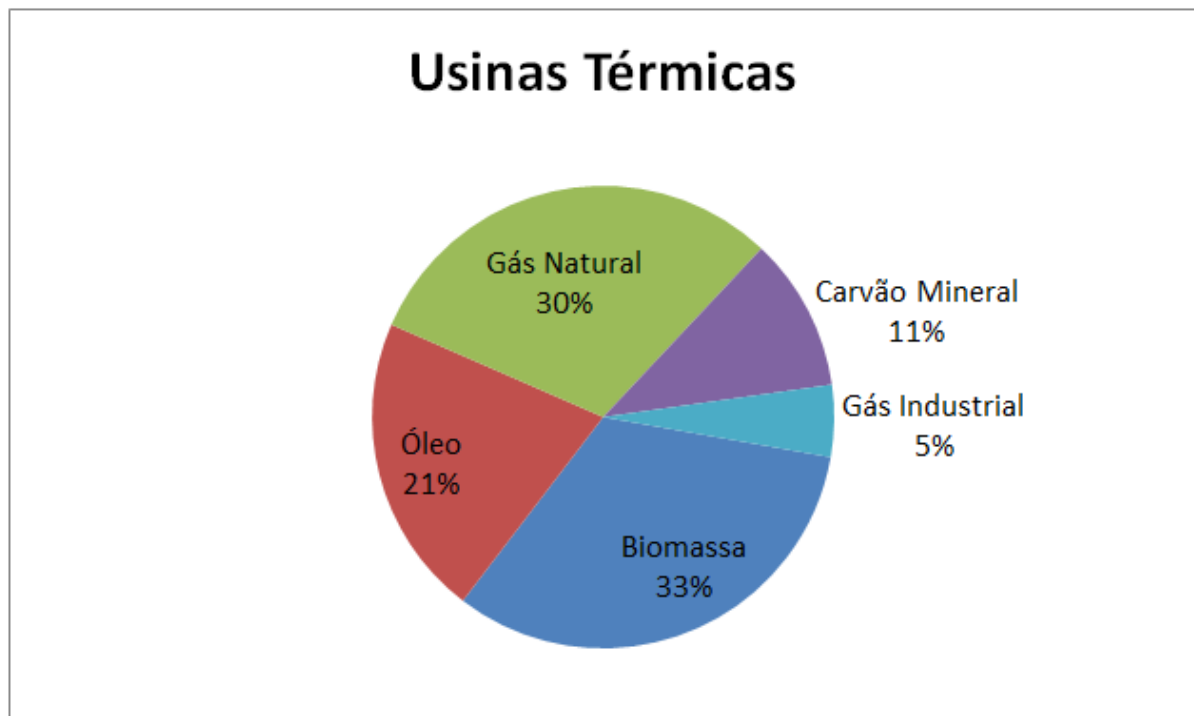
Fonte: (ANEEL, 2016)

Onde,

- Hídrica - Correspondem a todas as usinas geradoras que utilizam água como fonte de energia (Central Geradora Hidrelétrica (CGH), Pequena Central Hidrelétrica (PCH) e Usina Hidrelétrica (UHE)). Sendo que as UHEs correspondem a 94% da potência hídrica gerada.
- EOL - Central Geradora Eólica
- UFV - Central Geradora Solar Fotovoltaica
- UTE - Usina Termelétrica
- UTN - Usina Termonuclear

Percebe-se do gráfico que as duas fontes dominantes na matriz brasileira são a Térmica e Hídrica, correspondendo a aproximadamente 92% da geração total. Dentre as usinas térmicas, estão incluídas as usinas movidas a Carvão, biomassa e óleo. Todas elas juntas correspondem a 41.049 MW na capacidade instalada. Suas parcelas correspondentes são indicadas na Figura 8

Figura 8 – Participação das diferentes UTEs



Fonte: (ANEEL, 2016)

Dentre todas as termelétricas citadas, apenas a movida a biomassa é incentivada e considerada renovável. Apesar das fontes renováveis representarem a grande maioria da

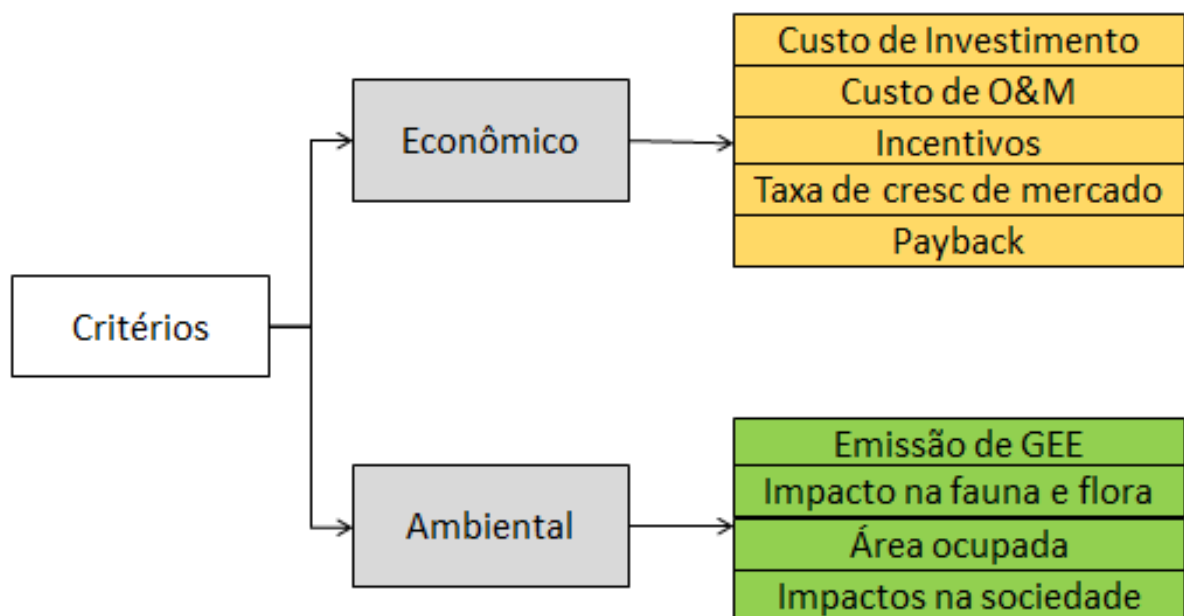
geração do país, ainda há uma forte incidência daquelas movidas a combustíveis fósseis. Constituindo uma parcela indesejável e contribuinte para a poluição do meio ambiente.

2.9 Metodologia

Essa pesquisa tem como principal objetivo analisar a viabilidade econômica e ambiental de uma usina eólica, visto que são os aspectos mais relevantes quando avaliada a necessidade de implementação de uma nova usina geradora de energia. A análise será embasada em artigos acadêmicos, pesquisas e notícias publicadas por agentes dos setores eólicos e dos setores energéticos em geral.

Os critérios escolhidos para avaliação estão indicados na Figura 9. Eles serão relatados individualmente para o caso da usina eólica. Ao final será feita uma análise comparativa, a partir dos mesmos critérios, das usinas eólicas com as usinas hidrelétrica e termelétrica. Visto que são as formas de geração mais presentes no setor energético brasileiro, suas características econômicas e ambientais constituem um bom parâmetro de comparação e provê a possibilidade de decisão da viabilidade de implantação das usinas eólicas.

Figura 9 – Hierarquia dos critérios utilizados para análise



Fonte: Do Autor

As definições dos critérios são:

- **Critério Econômico**

- **Custo de Investimento:** O custo necessário para a realização de pesquisa, aquisição de equipamentos, instalação e interligação da usina à rede elétrica.
- **Custo de O&M:** É o custo relativo à combinação de atividades necessárias que permitam o funcionamento daquela instalação. Os custos de operação podem incluir o seguro de turbinas, taxas e custo de arrendamento de terreno. O custo de manutenção pode incluir verificações de rotina, manutenção periódica, teste periódico, manutenção de equipamentos elétricos e custo de manutenções não previstas. Os custos de O&M podem ser divididos em fixos e variáveis. Os custos fixos são cobranças anuais independentes da quantidade de energia gerada. Os custos variáveis são proporcionais à quantidade de energia gerada;
- **Incentivos:** Relacionado a qualquer política tanto pública quanto privada que fomentam desenvolvimento das usinas de geração de energia elétrica;
- **Taxa de crescimento de Mercado:** Relacionado à existência de demanda de energia, ou seja, pela implementação de novos empreendimentos de geração e à competitividade da geração eólica em relação as outras fontes produtoras de energia elétrica;
- **Payback:** Relacionado ao tempo de retorno ou seja, a relação entre os custos de investimento na tecnologia e o lucro obtido a partir desse tipo de geração.

- **Critério Ambiental**

- **Emissão de gases poluentes:** Referente à taxa de emissão de gases como NO_x , CO_2 , CO , SO_2 e de partículas, tanto na geração quanto na construção dos componentes do sistema;
- **Impacto na Fauna e Flora:** Relativo ao quanto um tipo de usina pode agredir a vegetação e os animais;
- **Área Ocupada:** Relaciona quanto de área terrestre uma usina ocupa por cada MW de capacidade instalada;
- **Impacto na sociedade:** Diz respeito a quanto uma usina pode interferir nas vidas das pessoas residentes no local ou próximo à sua instalação.

3 Análise Econômica

O custo de produção de energia pode ser mensurado de diversas maneiras, cada uma com sua peculiaridade, sendo voltadas para diferentes aplicações. Os custos podem ser extremamente detalhados, entretanto, decidiu-se por uma análise mais genérica devido ao fato de ser mais abrangente, e ter menos variabilidade de região para região. Primeiramente será descrito e explicado detalhadamente todos os critérios econômicos de empreendimentos eólicos e em seguida esses parâmetros serão comparados às hidrelétricas e termelétricas

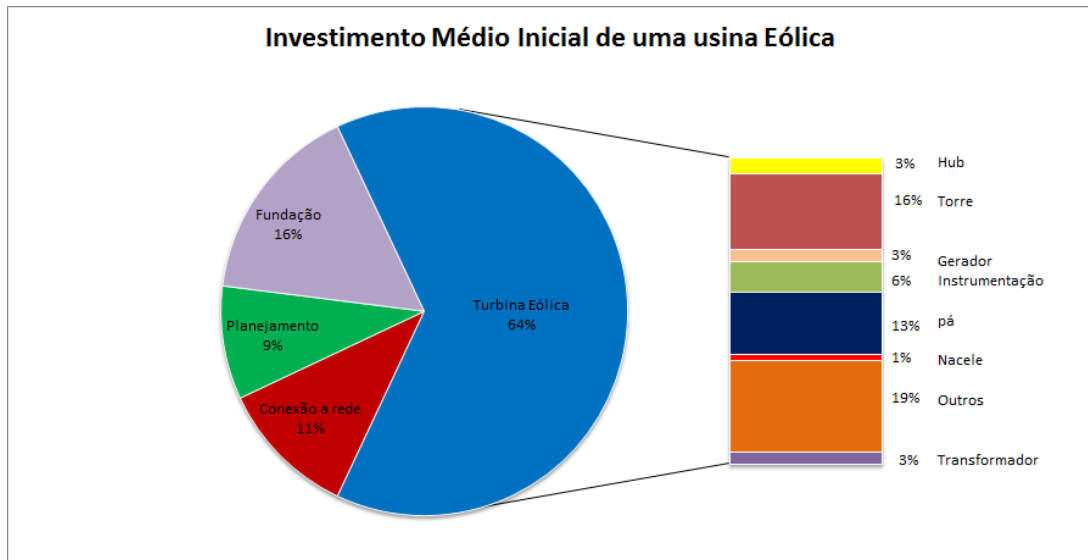
3.1 Análise Econômica de uma Usina Eólica

A determinação do custo capital de um sistema de energia eólico, é um dos assuntos mais desafiadores em energia eólica. O problema é complicado pois fabricantes de turbina eólica não estão abertos a compartilhar seus custos de produção. Assim como as empresas não disponibilizam os custos da potência (R\$/kW) instalada na construção de um parque eólico no Brasil. Esses dados são sigilosos grande parte por serem considerados estratégicos (CPFL; GESEL, 2015) (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

3.1.1 Custo de Investimento

Segundo o fabricante (Wobben), o valor médio em equipamentos para usinas de médio e grande porte (acima de 30MW) é de R\$4.200.000,00 por MW instalado. Este valor inclui o aerogerador, fundação, instalação elétrica e conexão à rede como indicado na Figura 10. Entretanto, trata-se de uma consideração genérica, visto que os valores variam de acordo com o diâmetro do rotor, velocidade do vento entre outros.

Figura 10 – Custo médio em equipamentos Usinas Eólicas



Fonte: Adaptado de MANWELL, MCGOWAN e ROGERS (2009) e Breeze (2012)

O termo outros, correspondente à 19% do custo, refere-se ao o custo de transporte dos equipamentos para a instalação das estações assim como a criação de estradas adequadas para possibilitar o transporte. Conforme indicado em ABDI (2014), o Brasil apresenta sérios problemas em relação à logística. Como os produtos transportados são de tamanhos acima de limites dimensionais e de peso, não há malhas rodoviárias adequadas e caminhões especializados, e as estradas já existentes são de qualidade ruim. Sendo assim, além do tempo de entrega aumentar consideravelmente, o valor do frete encarece muito os materiais.

Quando utilizadas as vias marítimas e produtos nacionais, há a restrição da utilização de somente navios de bandeira nacional, que geralmente possuem menor disponibilidade e custos maiores. Quando utilizados produtos importados, pode-se utilizar transporte naval internacional, sendo mais barato e mais especializado para o tipo de transporte. Por isso, em geral, há a preferência de importação de certos produtos (ABDI, 2014).

3.1.2 Custo de Operação e Manutenção (O&M)

Após a pesquisa e a instalação das turbinas eólicas, o custo de Operação e Manutenção é a fonte de gasto mais importante. De acordo com a análise realizada por Danish Wind Industry Association (2006), a partir de dados compilados de 5000 máquinas instaladas na Dinamarca, o custo de O&M, em 2006, era de cerca de 1,5 a 2% do custo capital de uma usina eólica.

No Brasil, os serviços de O&M são realizados pelos próprios fabricantes do aerogerador em parceria com empresas já consolidadas no setor elétrico com expertise em outros tipos de usinas (como hidrelétricas e termelétricas). Entretanto, com o vertiginoso crescimento da geração eólica nos últimos 6 anos, tem havido bastante dificuldade em relação aos serviços de O&M. A falta de mão de obra especializada, conhecimentos específicos ainda pouco disseminados no setor e custos muitas vezes elevados são alguns dos desafios que investidores estão enfrentando para garantir tal função dentro dos cronogramas previstos para os projetos e tendo em vista evitar paradas não programadas (ABDI, 2014), (SIMOES, 2015). Considerando o custo de O&M fixo como 2% do custo capital de uma usina eólica no Brasil, o valor seria em torno de 84.000 R\$/MW a cada ano. Não foi encontrada nenhuma informação a respeito do custo O&M variável, sendo assim considerou-se que o mesmo é de 0 R\$/MWh.

3.1.3 Principais Incentivos no Brasil

O crescimento da utilização de qualquer fonte de energia na matriz energética de um país está muito ligada à adoção de políticas que fomentam tal desenvolvimento. Esta seção visa analisar as principais políticas adotadas pelo Brasil para o estímulo da utilização da fonte eólica na sua matriz energética. Apesar de haver um vasto conjunto de políticas implícitas que afetam o desenvolvimento desta fonte no país, serão analisadas apenas as políticas explícitas.

1. Política de Estruturação de Mercado

- Proinfa - Criado em 2002, foi o primeiro modelo bem sucedido do Brasil na inserção de fontes alternativas. Sua legislação introduziu um marco institucional específico para as fontes alternativas¹ (até então inexistentes), meta de expansão para o uso de energia alternativa, que previa a implantação de 54 usinas eólicas, além de uma série de vantagens ao desenvolvimento de tais fontes, como a tarifa-prêmio², estabelecimento de cotas de contratação, contratos de venda de energia de longo prazo (inicialmente de 15 e depois estendidos para 20 anos) e condições favoráveis de financiamento pelo BNDES. Finalizado em dezembro de 2006, o Proinfa foi responsável por 41 projetos de energia eólica, com potência instalada de 964 MW (ELETROBRAS, 2010). Apesar de não ter conseguido atingir a meta estipulada, teve êxito em concluir grande parte dos projetos mesmo com um alto custo de geração dessas plantas à época.

¹ Eólica, PCH e Térmicas a biomassa

² Toda energia produzida pelo gerador é injetada na rede, sendo vendida a uma tarifa calculada de forma a garantir uma taxa interna de retorno (TIR) atrativa para o investidor

- Modelo de leilões - Se caracterizou como um novo marco regulatório no setor de comercialização de energia no país. Criado em 2004, seu principal objetivo foi aumentar a competitividade entre os empreendedores a fim de minimizar o custo do sistema elétrico, fato que se opunha ao Proinfa, que tinha como principal incentivo a tarifa-prêmio que garantia aos empreendedores remuneração acima do custo de geração. Essa incompatibilidade gerou a extinção do Proinfa ao final de 2006, e em 2007, foi criado um leilão de fontes alternativas (LFA).

As diferenças dos LFAs em relação aos demais tipos de leilão são que as fontes alternativas ficam livres da concorrência com as fontes convencionais e o preço inicial leva em consideração as características técnicas dos empreendimentos baseados em fontes alternativas. Devido ao alto custo de geração eólica no momento desse leilão, a mesma não foi contratada. Apenas a partir de 2009, quando o governo criou um leilão exclusivo para as fontes eólicas, que sua contratação foi significativa. Foram contratados 71 empreendimentos, totalizando 1.806 MW de potência. Os leilões conseguiram, apenas no ano de 2009, um maior número de contratação de energia eólica que em 4 anos de Proinfa. Após 2009, o número de contratações só aumentou e, conseqüentemente, o preço da geração eólica diminuiu. Com menor preço, aumenta-se competitividade, não sendo mais necessário o leilão exclusivo para tal geração (excluído em 2010) (GABRIELA; PODCAMENI, 2014).

2. Política Industrial

Como a decisão pela utilização de energia eólica no Brasil foi tardia, foi escolhida uma estratégia de atração de investimento direto estrangeiro (IDE). Para estimular a instalação de indústrias estrangeiras no país, inicialmente o PROINFA exigia um índice de industrialização nacional de 60% das turbinas eólicas. Porém, haviam poucos fabricantes para suprir a demanda contratada pelo programa no prazo estipulado, gerando-se mais obstáculos para a expansão eólica. Com o fracasso dessa estratégia, o governo suspendeu esse critério para os leilões de energias renováveis. Todavia, o BNDES dificulta o financiamento para projetos que não cumpram tal exigência. A partir de 2010, com o mercado internacional em crise, a valorização do real frente ao dólar, facilidades de financiamento para equipamentos nacionais pelo BNDES e o contínuo aumento da demanda por equipamentos, os fabricantes tem sido cada vez mais atraídos a se instalar no país e a aumentar sua capacidade de produção (GABRIELA; PODCAMENI, 2014) (SCHWINTECK; NEDDERMANN, 2012). Desde 2012, o BNDES vem aumentando as exigências para financiamento,

de modo que a industrialização se torne prioritariamente nacional e que novas tecnologias sejam desenvolvidas no Brasil.

3. Financiamento

Projetos de Energia Eólica demandam um capital inicial muito alto. Por essa razão, os custos de pesquisa e instalação são majoritariamente financiados. No Brasil, o BNDES é uma das empresas mais importantes de financiamento nessa área. Segundo Portal Brasil (2016) esse banco aprovou um financiamento de até 80% em Taxa de Juros a Longo Prazo (TJLP), com prazo de financiamento de 17 anos e carência de até 12 meses após a operação comercial.

Além do financiamento, há no país alguns incentivos fiscais que também ajudam no investimento de tais usinas. Esses incentivos estão citados abaixo e foram retirados de MME (2016b).

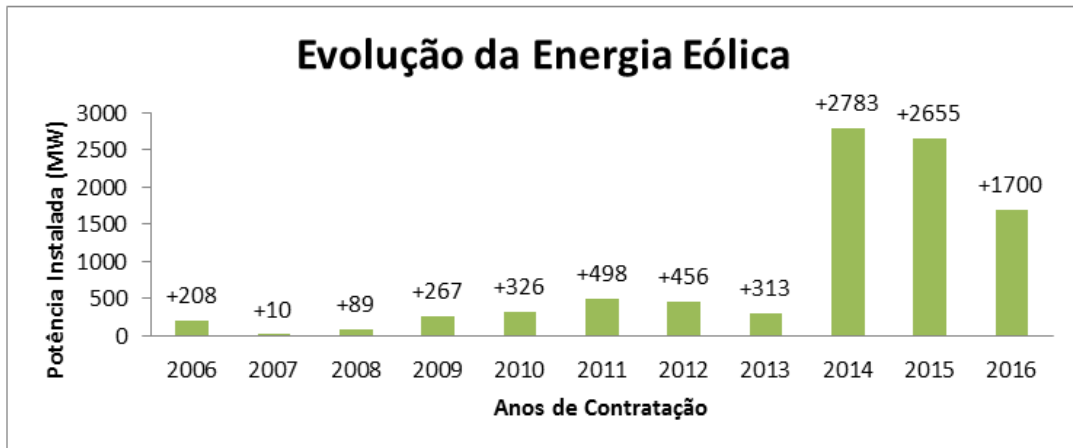
- Isenção de ICMS: - Isenção, até 2021, do Imposto Sobre Circulação de Mercadorias (ICMS) para as operações com equipamentos e componentes para o aproveitamento das energias solar e eólica (Convênio Confaz 101/97 e aditivos);
- Programa “Mais Alimentos”- Incluiu, desde 11/2015, os equipamentos para produção de energia solar e eólica, o que possibilita financiamentos a juros mais baixos.

3.1.4 Taxa de crescimento de mercado

Com a crise energética vivenciada no Brasil desde o início da década de 2000, quando uma grande seca diminuiu o nível de água nas barragens hidrelétricas no país, foi evidenciada a necessidade da diversificação da matriz energética brasileira para o suprimento da atual demanda e de demandas futuras. Somando-se esse fato ao excelente potencial eólico do Brasil, aos incentivos criados para implantação dessa fonte de geração e a crise internacional de 2010, o mercado eólico tem se tornado cada vez mais atrativo e sua produção tem aumentado muito de um ano para outro. A Figura 11 representa a evolução da geração eólica no Brasil, indicando quanto de potência foi adicionada à matriz desde o ano de 2006 à 2016.

A energia eólica está em terceiro lugar em participação de sua matriz energética, com 6,56% do total (Aproximadamente 10 GW). Além disso, a partir do ano de 2014, O Brasil se tornou o décimo maior país do mundo em geração eólica e o quarto em expansão dessa fonte (SCR, 2016).

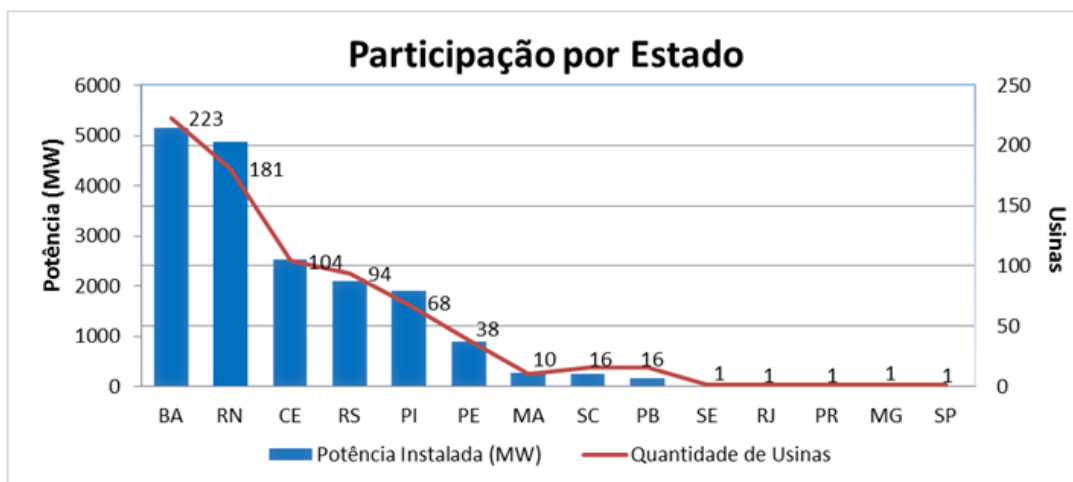
Figura 11 – Evolução da Energia Eólica no Brasil



Fonte: (SCR, 2016)

Os parques eólicos já em operação e em implantação estão localizados principalmente nas regiões costeiras dos estados da Bahia, Rio Grande do Norte, Ceará, Rio Grande do Sul, Piauí, Pernambuco, Maranhão, Santa Catarina e Paraíba. A Figura 12 ilustra os estados onde há geração eólica no Brasil.

Figura 12 – Participação da Energia Eólica nos Estados

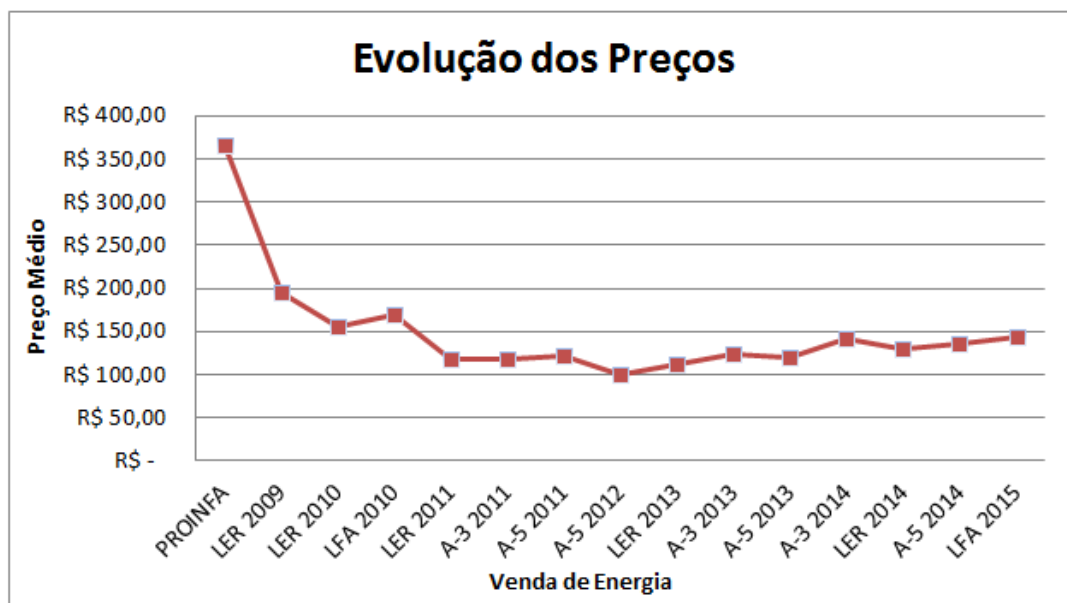


Fonte: (SCR, 2016)

O aumento de parques eólicos e de indústrias produtoras de turbina provoca uma redução no custo de investimento, refletindo também nos preços de energia negociados nos leilões. No PROINFA, a energia foi vendida a um preço médio de 366 R\$/MWh. No primeiro leilão, em 2009, o preço foi reduzido a 195 R\$/MWh. Ao longo dos leilões sub-sequentes esse preço foi diminuindo até atingir o menor patamar de 99 R\$/MWh em 2012. Mantendo-se entre 100 e 150 R\$/MWh até 2015. O gráfico apresentado na Figura

13 ilustra o explicado anteriormente. De acordo com tais dados, o preço médio reduziu praticamente 73% de 2009 a 2012.

Figura 13 – Evolução dos Preços da Energia Eólica Contratada nos Leilões



Fonte: (MME, 2016b)

O fato do preço do leilão ter caído drasticamente e ter se mantido em um intervalo praticamente constante indica a queda dos custos pois os preços de venda de energia são baseados nos custos de geração e investimento acrescidos de um valor tal que haja retorno econômico para o empreendedor. Dessa maneira, observa-se a alta competitividade dessa fonte no setor energético, assim como a tendência de se manter nessa posição ou até mesmo aumentar.

3.1.5 Payback

O Payback é o tempo de retorno do investimento realizado na usina. Para analisá-lo, leva-se em consideração critérios como Fator de Capacidade, tempo de vida útil e o tempo de construção, que são descritos abaixo.

- Fator de Capacidade - O FC de uma usina eólica tem aumentado bastante à medida que a tecnologia em materiais e altura das instalações avançam. Fatos que permitem um aproveitamento maior e mais eficiente do vento. Foi divulgado por MME (2016a) que dentre os países de maior geração eólica, o Brasil é o que tem o maior fator de capacidade (FC). Sendo esse fator médio de 43%, superando em 65% o dado médio global (TOMALSQUIN, 2016a).

- Tempo de vida útil - É uma prática comum tornar o tempo de vida econômico igual ao tempo projetado de funcionamento nos parâmetros especificados pelo projetista de uma usina de energia eólica. Segundo Danish Wind Industry Association (2006), 20 anos é um compromisso econômico útil e rentável.
- Tempo de Construção - Como indicado em Simis (2010), uma usina eólica demanda até 18 meses para sua construção. Analisando os leilões realizados para tais usinas, confirma-se que o tempo demandado é de fato baixo, visto que os projetos vencedores dos leilões, têm de 2 a 3 anos desde a realização do leilão até a entrada de operação das usinas.

Para o cálculo de *Payback*, foi utilizado o método do período de análise simples de *Payback*, disponível no Anexo A, e considerada uma usina de 30MW. A Tabela 4 resume todos os dados para análise econômica, inclusive alguns deles foram utilizados para calcular o *Payback*.

Tabela 4 – Parâmetros para análise econômica de uma usina Eólica

Parâmetros	Valor
Custo de Investimento	4.200.000 (R\$/MW)
Custo de O&M fixo	84.000 (R\$/MW.ano)
Fator de Capacidade	43%
Tempo de Construção	2 anos
Vida útil	20 anos
Payback	8 anos

Fonte: (TOMALSQUIN, 2016a)

Foi concluído que o tempo para recuperar todo investimento é de 8 anos. Análises mais complexas que consideram parâmetros de financiamento como taxa de juros, duração da dívida, isenções fiscais e entre outros, foram realizados em Melek (2013) e Simis (2010) e foram encontrados valores de 11 e 15 anos respectivamente. Vale frisar que os parâmetros escolhidos são valores médios e estimados, utilizados apenas como base para comparação com as outras formas de geração, visto que eles variam muito com a região e com a economia do país.

3.2 Análise Comparativa

Para o julgamento da viabilidade econômica da usina eólica, é necessário que os valores apresentados anteriormente tenham algum parâmetro de comparação. Dessa maneira, tais dados serão comparados com informações de usinas termelétricas à carvão e de usinas hidrelétricas de grande porte.

Semelhante à geração eólica, uma termelétrica tem seus valores de custo muito variáveis. Os custos tanto de investimento, O&M e de combustível, são sensíveis à tecnologia utilizada pela usina, ao preço dos insumos, às variações cambiais, com o modo de armazenamento, mineração, transporte e qualidade do combustível, ao regime de operação da usina, e às restrições ambientais (que podem aumentar em até 30% no valor do projeto). Apesar dos valores mínimos e máximos dos custos terem uma distância considerável, serão utilizados sempre os valores médios (TOMALSQUIN, 2016b).

Devido ao seu grande potencial hídrico, desde a crise do petróleo que o Brasil vem explorando essa fonte de energia de maneira intensiva. Portanto, diferentemente das usinas supracitadas, o Brasil possui conhecimento completo ao longo da cadeia produtiva das usinas hidrelétricas de pequeno e grande porte. Desde ao projeto de turbinas à engenharia civil, o Brasil é capaz até de exportar o conhecimento (TOMALSQUIN, 2016a). Com o domínio da tecnologia, a implantação dessas usinas se torna independente da prestação de serviço de empresas internacionais, além conseguir fabricar todos os componentes necessários nacionalmente. Diminuindo a variabilidade do custo de investimento e de O&M.

A Tabela 5 ilustra os valores de custo de investimento, de O&M, de combustível, fator de capacidade, tempo de vida útil, tempo de construção e Payback para as usinas Termelétrica e Hidrelétrica de 300MW e Eólica de 30W.

Tabela 5 – Parâmetros para análise econômica

Parâmetros	Valores (UHE)	Valores (UTE)	Valores (EOL)
Custo de Investimento	7.238.300 (R\$/MW)	6.656.000 (R\$/MW)	4.200.000 (R\$/MW)
Custo de O&M Fixo	41.600 (R\$/MW.ano)	-	84.000 (R\$/MW.ano)
Custo de O&M Variável	5,76 (R\$/MWh)	31(R\$/MWh)	-
Custo de Combustível	-	128 (R\$/MWh)	-
Fator de Capacidade	55%	66%	43%
Vida Útil	50 (anos)	40 (anos)	20(anos)
Tempo de Construção	8 (anos)	4 (anos)	2 (anos)
Payback	12 (anos)	9 (anos)	8 (anos)

Fonte:(TOMALSQUIN, 2016b) e (TOMALSQUIN, 2016a)

A análise da Tabela 5 mostra que o custo de investimento unitário de uma usina eólica é o mais baixo de todos. Porém o payback de todas as três usinas é bem parecido e a vida útil tanto da hidrelétrica quanto da termelétrica é bem maior que da eólica, significando obtenção de lucro por muito mais tempo.

³ Esse valor é a média dos custos de investimento das indústrias em construção ou planejadas em 2015

⁴ O FC máximo de uma termelétrica varia entre 88% e 91%.

⁵ Calculado nos Anexos B e C

Em relação ao tempo de construção, uma usina eólica de grande porte demora muito menos tempo para ser construída, gerando receita mais rápido. Todavia, a termelétrica e a hidrelétrica de mesmo porte têm capacidade de geração cerca de dez vezes maior. Dividindo o tempo de construção pela capacidade da usina, é obtida uma maneira ilustrativa de contabilizar a quantidade de tempo dispendido para cada MW. Feito os cálculos foi possível concluir que a usina eólica dispende mais tempo de construção por cada MW projetado.

Os custos de Operação e Manutenção são distintos. A usina Eólica possui apenas o custo fixo, ou seja, independente da geração anual, será pago sempre uma mesma taxa. Essa taxa tende a ser mais alta, por ser uma tecnologia nova e haver menos oferta de mão de obra. Já no caso da hidrelétrica ocorre exatamente o oposto, por ser utilizada a muito tempo, seu custo O&M fixo é muito mais baixo.

Em relação ao custo variável, a eólica não possui e a hidrelétrica possui um valor muito baixo. No custo da termelétrica estão incluídos produtos químicos, fundidos de moagem, gases especiais, produção de água, etc.. Além da própria manutenção em si. Pelo fato da termelétrica ter muito mais variáveis envolvidas, conclui-se que se operada na mesma proporção, ou seja, utilizada na geração de base, o custo final de O&M seria muito mais alto.

Apenas as termelétricas apresentam custo de combustível. Esse combustível tem seu valor variável de acordo com a disponibilidade, com o transporte e, para o carvão importado, o custo também se altera com as variações cambiais. A dependência de terceiros e a possibilidade de falta sempre será um aspecto ruim da dependência de combustíveis fósseis e sempre gerará uma incerteza quanto ao suprimento de energia em um futuro próximo.

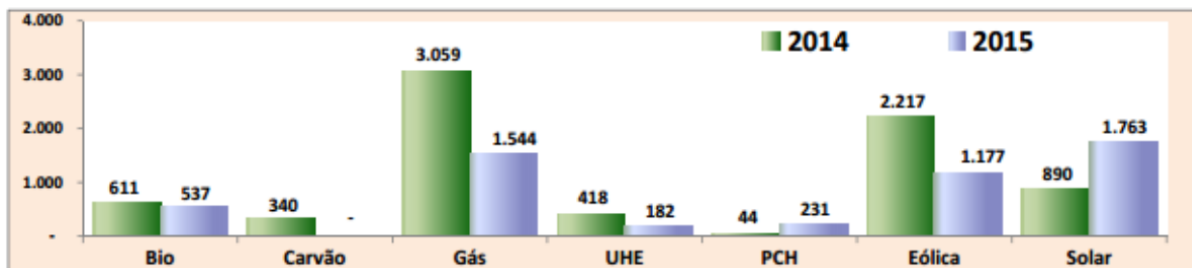
O Fator de Capacidade das usinas eólicas é o mais baixo de todos devido à característica intermitente do vento, o que significa que haverá momentos de altas e baixas na geração eólica. Já o fator de capacidade das hidrelétricas é diretamente proporcional à quantidade de chuva anual. As usinas de reservatório conseguem armazenar água para os momentos de seca, entretanto, não são suficientes caso a estiagem seja muito longa. As usinas térmicas possuem um fator de capacidade quase máximo, porém elas só são acionadas quando as hidrelétricas e as outras fontes renováveis não são capazes de suprir a demanda, visto que o custo de operação das renováveis é muito menor.

Quanto aos incentivos, houveram dois marcos importantes em 2016. Um possível incentivo à construção de novas termelétricas foi vetado pelo presidente Michel Temer

(FOLHAPRESS, 2016) e o Banco BNDES declarou que não dará apoio aos investimentos em termelétricas a carvão e óleo combustível, enquanto financiará 80% das fontes renováveis (eólica, fotovoltaica, PCHs e biomassa). Já as hidrelétricas de grande porte vêm perdendo espaço, o BNDES reduziu o teto de financiamento de 70% para 50%. Tudo isso para desestimular a utilização de combustíveis fósseis e estimular a variabilidade da matriz energética (BNDES, 2016).

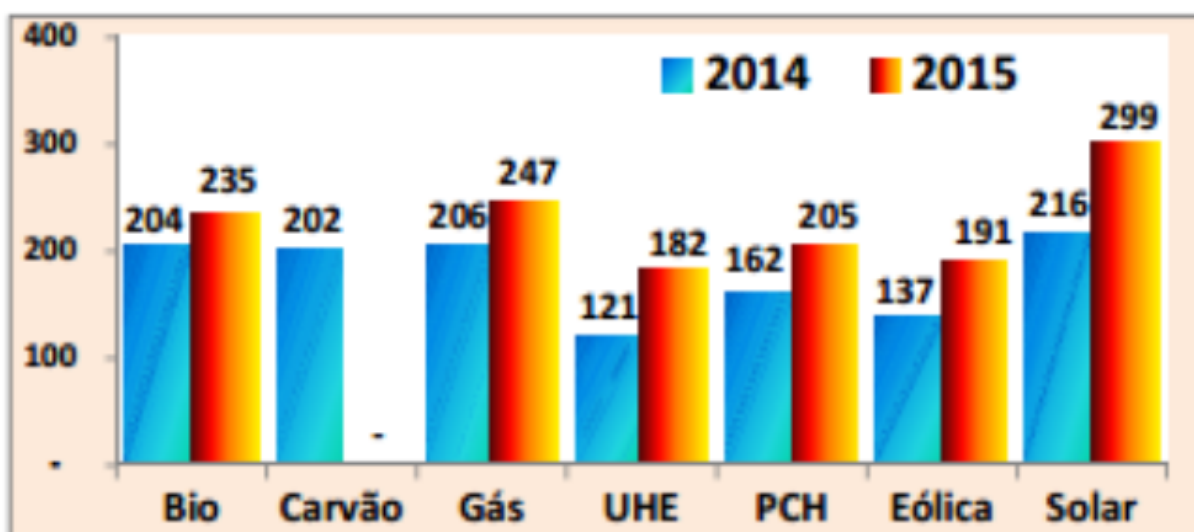
As Figuras 14 e 15 ilustram quantos MW foram contratados de cada usina em 2015 e o preço médio de venda de energia nos leilões respectivamente. Enfatizando a alta competitividade da geração eólica, visto que seu preço nos leilões foi o segundo mais baixo e foi a segunda maior capacidade contratada.

Figura 14 – MW Contratados em 2015



Fonte:(MME, 2016d)

Figura 15 – Preço Médio (R\$/MWh)



Fonte:(MME, 2016d)

Observa-se da Figura 15 que a geração eólica possui preços de venda de leilão muito próximos aos preços de venda das UHEs e abaixo dos preços das PCHs. Esse é um marco importante, visto que a fonte hídrica sempre se caracterizou por possuir os menores preços. O maior número de contratações da fonte eólica quando comparada com as contratações da maioria das outras fontes, justifica-se por essa baixa no preço dos leilões.

4 Análise Ambiental

Impacto ambiental de acordo com CONAMA (1986) significa qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente causada por alguma forma de matéria ou energia resultante de atividades humanas, que direta ou indiretamente afetam a sociedade.

O uso da energia eólica tem benefícios substanciais para o meio ambiente. Isso se deve ao fato desse tipo de geração não emitir quantidades significativas de gases poluentes, tanto na sua fabricação quanto no seu funcionamento. A redução da emissão de gases, significa uma melhor qualidade de vida e preza pela conservação do meio ambiente (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

Todavia, fontes renováveis também apresentam aspectos ambientais negativos. Esse capítulo irá identificar os aspectos positivos e os potenciais aspectos negativos associados à implantação de uma usina eólica. Por conseguinte, serão comparados os impactos positivos e negativos das usinas eólicas com as usinas hidrelétricas e termelétricas a carvão.

4.1 Análise Ambiental de uma Usina Eólica

A geração eólica é benéfica para a sociedade pois não há processos de combustão na sua geração, não havendo portanto, emissão de gases poluentes como o material particulado ou óxidos de enxofre e menos ainda, gases contribuintes para o efeito estufa (GEE). Avaliando um empreendimento eólico, desde a construção dos seus componentes à sua operação, a energia eólica possui uma média de $12 \text{ kgCO}_2/\text{MWh}$. Sendo essa taxa maior apenas que as hidrelétricas e que a geração oceânica (IPCC, 2012).

Além dos benefícios ambientais, consideram-se importantes os desenvolvimentos sociais trazidos por tais empreendimentos. Tais como a atração de investimento para áreas desfavorecidas, geração de novos empregos e a possibilidade de utilização do terreno mesmo com as usinas eólicas. Destaca-se, por exemplo, a concentração de usinas eólicas na região do Nordeste que é um dos estados mais subdesenvolvidos do país, trazendo dessa maneira novas fontes de renda à sociedade local, além de atrair turistas para regiões remotas e pouco procuradas, aumentando a receita e o desenvolvimento da região. Por fim, também considera-se como impacto positivo, a variabilidade da matriz energética, que reduz o risco de novos apagões e diminui a utilização das usinas termelétricas.

Os possíveis impactos negativos provenientes de uma usina eólica serão explicados nas subseções adiante.

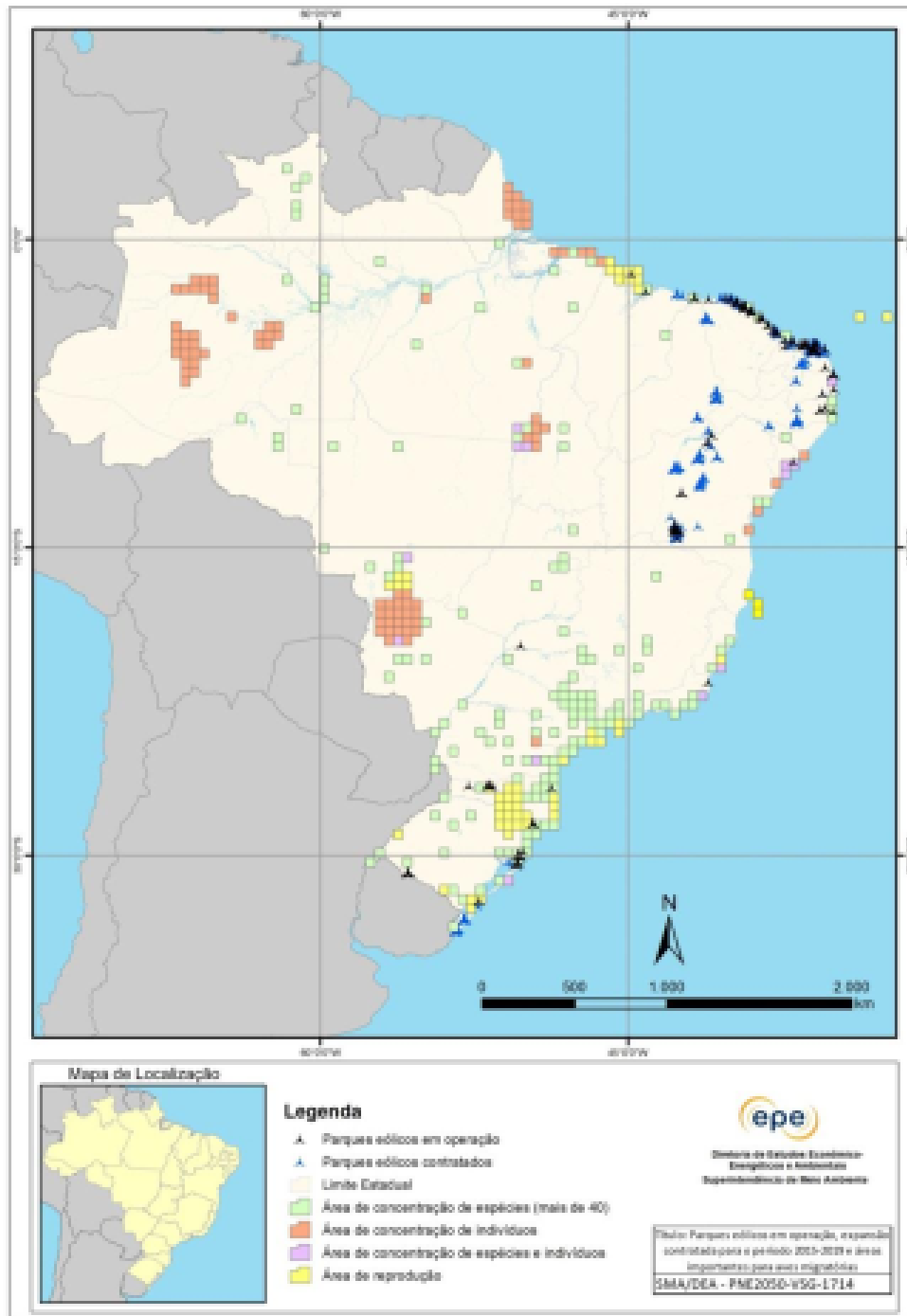
4.1.1 Impacto Sobre a Fauna

As turbinas eólicas provocam alguns impactos na vida das aves. Alguns deles como mortalidade por colisão, mudança de hábitos migratórios, alimentícios e de reprodução assim como a redução de habitats (COLSON, 1995). Existem espécies de pássaros muito sensíveis à mudança de habitat. Dessa maneira, exige-se um critério muito grande na escolha da localização de parques eólicos, assim como um contínuo monitoramento.

Além da correta escolha da localização, algumas medidas podem ser realizadas para a mitigação dos efeitos. Tais como a instalação de radares de modo a detectar bandos de aves se aproximando, exigindo a parada das turbinas (DERMOTT, 2009). A construção de menor quantidade de turbinas em maiores dimensões, reduzindo a velocidade de rotação e o número de estruturas. Construção de linhas de transmissão subterrâneas, evitando o eletrocutamento das aves. Mudança no design de torres, pois as treliçadas estão relacionadas ao maior número de mortes (COLSON, 1995).

Infelizmente, muitos dos locais considerados de alto potencial eólico são também atraídos aos pássaros. No caso do Brasil, as regiões nordeste e sul possuem importantes rotas aéreas de descanso para aves migratórias de longas distâncias, inclusive algumas protegidas internacionalmente. Desta forma dependendo do local, devem ser realizados estudos mais detalhados para o licenciamento ambiental além de serem recomendadas as medidas mitigatórias citadas (TOMALSQUIN, 2016a). A Figura 16 indica as áreas de maiores concentrações de espécies e de reprodução das aves e os locais onde há a instalação de parques eólicos.

Figura 16 – Parques eólicos em operação, expansão contratada para o período 2015-2019 e áreas importantes para aves migratórias



Fonte: (ANEEL, 2015) (CEMAVE, 2014)

4.1.2 Impacto visual

O fator estético também é motivo de preocupação dos engenheiros projetistas. Porém, esse é um critério difícil de ser quantificado, pois varia muito com o ponto de vista, com o local em que a usina será implantada e alguns outros fatores. Apesar de sua natureza sub-

jetiva, os profissionais dessa área são treinados para fazer julgamentos sobre o impacto visual baseados nos seus conhecimentos da composição visual do local e identificando elementos como clareza visual, harmonia, equilíbrio, ordem e hierarquia (STANTON, 1996).

Em geral, questiona-se mais quando a implantação de usinas residem em locais que sofreram pouca alteração em sua natureza original. Portanto, a melhor maneira de se evitar tais interferências é escolher locais já antropizados ou áreas onde haja pouco interesse turístico. Outra maneira de mitigar esse problema seria a utilização de projetos arquitetônicos, como a mudança da geometria da disposição das turbinas, a pintura das pás, a escolha das estruturas de maneira estética, etc..(STANTON, 1996).

É importante citar que em muitos locais as fazendas eólicas geraram o efeito contrário na população, pois passou a ser motivo de curiosidade, levando os visitantes a locais isolados e de pouca atratividade turística (TOMALSQUIN, 2016a).

Segundo a resolução Conama 462/2014 CONAMA (2014), deixam de ser considerados locais de baixo impacto ambiental, empreendimentos que se localizem:

1. Em formações dunares e áreas úmidas;
2. No bioma Mata Atlântica e impliquem em supressão de vegetação primária e secundária no estágio avançado de regeneração;
3. Na Zona Costeira e que impliquem em alterações de suas características naturais;
4. Em zonas de amortecimento de unidades de conservação de proteção integral
5. Em áreas importantes para aves migratórias;
6. Em locais em que o empreendimento venha a causar impactos socioculturais diretos;
7. Em áreas de ocorrência de espécies ameaçadas de extinção e áreas de endemismo restrito;

4.1.3 Poluição Sonora

O problema associado com o barulho das turbinas eólicas tem sido um dos impactos ambientais mais estudados na área de geração eólica. O nível de barulho pode ser medido, mas assim como outros problemas ambientais, a maneira como o público vai perceber esse barulho, é um critério subjetivo (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

Preocupações a respeito desse barulho dependem do nível da intensidade, frequência, distribuição de frequência, a distância entre o emissor e o receptor e a natureza do receptor. Os efeitos do som em pessoas podem ser definidos em três categorias:

- Efeitos subjetivos, incluindo irritação, incômodo e insatisfação;
- Interferência em atividades como discurso, sono e aprendizado;
- Efeitos psicológicos como ansiedade, zumbido nos ouvidos ou perda de audição;

A maioria dos casos de poluição sonora está contida nas duas primeiras categorias. Trabalhadores das plantas industriais são os únicos que podem ter uma experiência da terceira categoria (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

Em geral as usinas eólicas estão em locais ermos que possuem pouco barulho de fundo, evidenciando o som das turbinas. Sendo assim, uma maneira de mitigar o problema seria implantar as usinas em locais já barulhentos. Outras soluções para reduzir esse problema já estão sendo criadas, como a mudança do desenho da lâmina e modificações na turbina. Todavia, mesmo as turbinas muito bem desenvolvidas geram barulhos através da caixa de velocidade, freio, componentes hidráulicos ou mesmo os dispositivos eletrônicos (TOMALSQUIN, 2016a).

A exigência quanto ao distanciamento de turbinas eólicas assim como o máximo de ruído aceitável, muda de acordo com o país e com a região. No Brasil, a Resolução Conama 462/2014 CONAMA (2014), em sua proposta de Termo de Referência para Estudos de Impacto Ambiental, exige estudos específicos sobre ruído apenas para parques a serem instalados a 400 m de residências isoladas ou comunidades.

4.1.4 Efeitos de interferência magnética

As interferências eletromagnéticas (EMI), são distúrbios eletromagnéticos que interrompem ou obstruem a performance de dispositivos eletrônicos e elétricos. As turbinas eólicas, se localizadas entre dispositivos emissores de ondas eletromagnéticas e o receptor do sinal, podem ter impactos negativos em vários sinais importantes para as atividades humanas, como televisão, rádio, sistemas de transmissão por microondas, telefones celulares e radar (National Academy of Sciences, 2007).

Alguns fatores que mais interferem na EMI são o tipo de turbina, de eixo horizontal ou vertical, as suas dimensões, sua velocidade rotacional, material de construção da hélice sua angulação e geometria da torre. Não existe um modelo padrão que resolva todos

os problemas de interferência, as soluções são específicas para cada tipo de sinal e para cada local. Dessa forma já existem em alguns países grupos especializados em identificar potenciais problemas de EMI e em criar soluções adequadas (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

4.1.5 Uso do Solo

As fazendas eólicas requerem maior utilização de terreno que a maioria das outras tecnologias. São cerca de 4 a 32 hectares de terra por megawatt de capacidade instalada. Essa grande ocupação justifica-se pela necessidade de um distanciamento mínimo entre as turbinas, para que a interferência sobre o vento em outra turbina seja mínima, maximizando a geração de energia (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

Dessa maneira, apesar da grande quantidade de terra necessária, as turbinas eólicas ocupam fisicamente apenas uma parcela pequena desse terreno, sendo o restante inutilizável para os desenvolvedores da usina. No Brasil, por exemplo, uma usina eólica ocupa apenas 5% de todo terreno necessário, deixando os outros 95% para outros fins (NETO; VIEIRA, 2009).

Os desenvolvedores das usinas possuem duas opções em relação ao terreno: comprar ou arrendar. Comprar possui um custo maior e gera um desperdício de terra, visto que os desenvolvedores não usufruiriam das terras excedentes para outros fins. Em contrapartida, o arrendamento é economicamente mais viável, pois os pagamentos são distribuídos ao longo da vida do projeto e os proprietários além de possuírem uma fonte de renda diversificada, podem ainda se utilizar dos terrenos ociosos para agropecuária (NETO; VIEIRA, 2009).

No contrato de arrendamento de terreno devem ser incluídas cláusulas que mantenham a integridade do vento e das turbinas para os desenvolvedores, como o impedimento do plantio de árvores, ou prédios muito altos a uma mínima distância assim como a proibição de caça de animais e da queima de cana-de-açúcar, visto que podem danificar as turbinas. Condições também devem ser feitas para que se conserve o terreno, como a previsão de possíveis ocorrência de danos e consecutivo pagamento de compensações (NETO; VIEIRA, 2009).

Algumas medidas para suavizar a natureza industrial do projeto e manter a integridade do terreno são propostas por NWCC (2011). Elas incluem a seleção de equipamentos com o mínimo de suportes estruturais, utilização de linhas elétricas subterrâneas, construção de turbinas maiores e mais eficientes em menor quantidade, evitar a construção de

estradas para reduzir a perda de terreno, restringir a utilização das estradas de acesso à maioria dos veículos.

4.2 Análise Comparativa

A análise comparativa dos impactos ambientais não é direta como no caso da análise econômica. Isso se deve ao fato de cada tipo de usina causar impactos específicos e, em geral, distintos entre si. Dessa maneira, foram escolhidos alguns critérios mais abrangentes para a análise. São eles:

1. Emissão de gases poluentes

Segundo IPCC (2012), dentre as formas de geração, as hidrelétricas são as menos poluentes em termos de emissão de gases contribuintes para o efeito estufa (GEE). As termelétricas movidas a carvão possuem a maior taxa média de CO_2 , cerca de 250 vezes mais que a geração hidrelétrica. A Tabela 6 indica os valores máximos, mínimos e médios de emissão de CO_2 dos três tipos de usinas comparadas (a Tabela original, contendo todas as formas de geração, encontra-se disponível no Anexo E).

Tabela 6 – Emissões de $(kg.CO_2)/MWh$ por fonte de geração

Valores	Hidrelétrica	Energia Eólica	Carvão
Mínimo	0	2	675
50%	4	12	1001
Máximo	43	81	1689

Fonte: (IPCC, 2012)

Estimativas apontam que o carvão é responsável por entre 30% a 35% do total de emissões de CO_2 do mundo. Além do gás carbônico, as termelétricas emitem grandes quantidades de nitrogênio, enxofre, hidrocarbonetos, monóxido de carbono (NO_x , SO_2 , HC e CO) e particulados que têm impacto tanto no aquecimento global quanto na ocorrência de chuvas ácidas (TOMALSQUIN, 2016b). Na Tabela 7 são apresentados as taxas de emissão dos componentes citados a partir queima de carvão mineral pelas centrais de geração elétrica.

Tabela 7 – Emissão de gases e material particulado na combustão do carvão mineral

Material particulado (kg/t)	SO_2 (kg/t)	NO_x (kg/t)	HC (kg/t)	CO (kg/t)
20,00	3,8	9,0	0,15	0,5

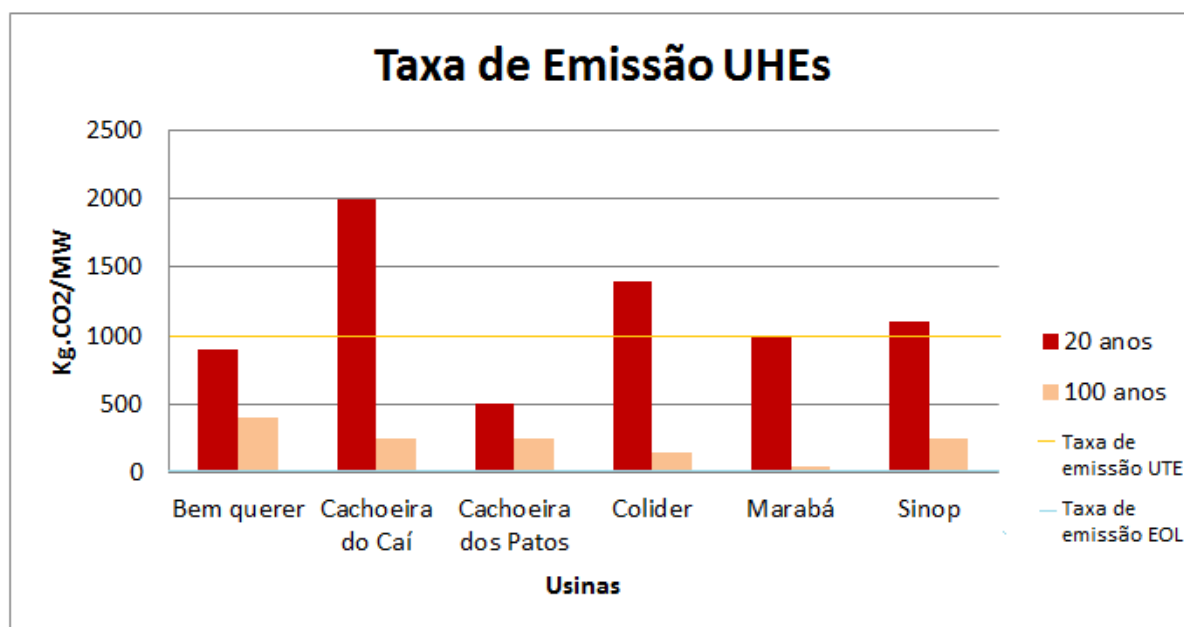
Fonte: (PNE 2030, 2007)

As taxas de emissão de GEE por parte das termelétricas poderiam ser drasticamente reduzidas com a implantação de novas tecnologias para a sua geração e com a utilização de carvão de alta qualidade. Todavia, cerca de 70% das usinas termelétricas a carvão do Brasil são muito antigas, e portanto não possuem tais tecnologias, e o carvão nacional, disponível em grande quantidade, é considerado de qualidade ruim (TOMALSQUIN, 2016b).

Apesar da baixa taxa de emissão das hidrelétricas, sua construção em áreas tropicais pode acarretar a emissão de CO_2 e de gás metano CH_4 por meio da decomposição da matéria orgânica inundada. Esses dois gases são os maiores contribuintes para o efeito estufa, sendo o gás metano 32 vezes mais poluente que o gás carbônico (FARIA et al., 2015).

Faria et al. (2015) realizou um estudo sobre a possível taxa de emissão de GEE das hidrelétricas presentes na bacia Amazônica baseado na área florestal alagada. Nele foi estimado que 3 das 18 UHEs analisadas apontam emissões similares a das termelétricas e que outras 3 podem ter taxas ainda maiores. A Figura 17 ilustra a quantidade de CO_2 equivalente por MW de capacidade nos primeiros 20 anos e ao longo dos 100 anos pelas 6 hidrelétricas.

Figura 17 – Taxa de Emissão de GEE das UHEs localizadas na bacia Amazônica



Fonte: (FARIA et al., 2015)

Conclui-se dessa Figura que, as usinas Hidrelétricas, se forem construídas em locais com muita matéria orgânica, apesar de não realizarem combustão para geração, apresentam alta taxa de emissão de CO_2 nos primeiros 20 anos. Os próximos 30 anos de vida útil que em geral essas usinas possuem, seriam basicamente para “pagar” a quantidade de gases emitidos nos primeiros 20. Não contribuindo dessa maneira para a redução das taxas de emissão de GEE como costuma-se dizer.

2. Impacto sobre a Fauna e Flora

O Brasil possui um grande potencial hídrico, cerca de 173 GW, do qual 68 GW ainda não foram aproveitados. As bacias hidrográficas Amazônica e Tocantins-Araguaia correspondem a 66% de todo o potencial inexplorado do país. Ambas localizam-se na região Norte que possui como bioma a mata atlântica e como relevo a planície, que significa que são áreas protegidas, com vasta variedade na fauna e na flora, e que necessitam de maiores barragens para a constituição de uma queda d’água aproveitável para geração de energia (TOMALSQUIN, 2016a).

A construção de barragens é o fator mais relevante quando se fala em impacto ambiental de usinas hidrelétricas. Quanto maior a barragem, maior a área alagada, significando perda dos animais terrestres, que em muitos casos não possuem agilidade para escapar do alagamento e em outros não conseguem se readaptar ao novo habitat além da perda de toda a vegetação local (MENDES, 2005).

A hidrelétrica afeta também a vida aquática do rio em questão, pois com a construção das barragens, há uma alteração no regime das águas que deixam de ter mais movimento ou correnteza para terem um comportamento mais calmo. Essa mudança altera a vida de muitos peixes que necessitam do comportamento lótico das águas para reprodução (JONG; KIPERSTOK; TORRES, 2015).

A queima do combustível em uma termelétrica acontece para que seu calor condense a água, transformando-a em vapor para girar a turbina. Para que esse processo ocorra, as termelétricas devem ser instaladas próximas a leitos de rios ou mar. Isto acarreta a elevação da temperatura da água local, pois esta é devolvida mais quente, o que pode comprometer a fauna e a flora da região, além de aumentar também a temperatura média local. Esse é apenas o impacto direto sobre a fauna e a flora pois com a queima de combustível, há a emissão de muitos gases que elevam o clima mundial e acidificam as águas (INATOMI; UDAETA, 2014).

O efeito acumulativo da chuva ácida impacta ambientes, colheitas, materiais florestais e aquáticos. Por exemplo, lagos ácidos possuem dificuldade para manter

a pesca; a acidez pode retardar o crescimento de árvores e causar danos ao solo; reduzem campos rurais, e prejudicam as plantas (INATOMI; UDAETA, 2014).

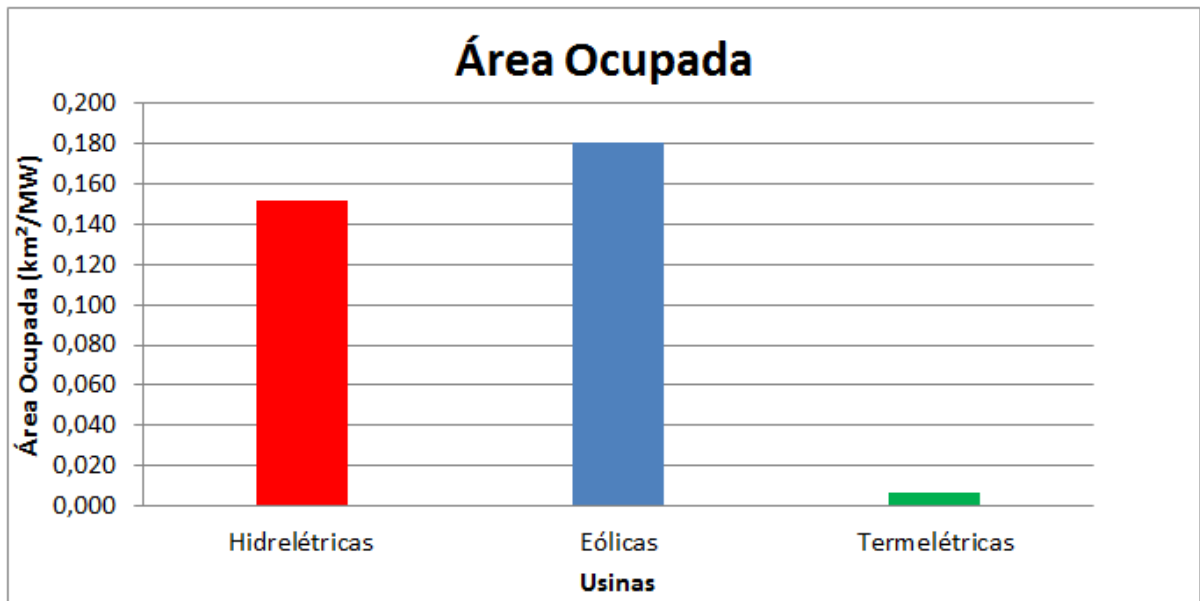
A elevação do clima mundial por meio do efeito estufa traz diversas consequências como: o derretimento das calotas polares, secas severas e o aumento de incêndios. Todos esses aspectos impactam diretamente na flora e na fauna mundial. Os animais da região do ártico por exemplo estão perdendo cada vez mais espaço para sobrevivência; com as secas severas faltará água em determinadas regiões que afetará a vida de diversos animais; os incêndios matarão mais uma enorme quantidade de animais assim como toda a flora do local; e a alteração dos níveis aquáticos pode alagar algumas regiões e causar a destruição de corais e recifes levando muitas espécies de peixes e plantas em extinção (MACMILLAN, 2016).

Em suma, para a constituição de uma hidrelétrica acontece a devastação de toda a flora presente na área da barragem e ainda há uma grande mortalidade de animais terrestres e aquáticos. As termelétricas impactam não só na vida aquática e terrestre local, como também em todo tipo de fauna e flora mundial através da poluição atmosférica. Já no caso das eólicas, a devastação da flora ocorre apenas nos locais de implantação das turbinas (5% da área da fazenda eólica) e há mortalidade apenas dos pássaros, que segundo SOVACOOOL (2009), essa taxa é de 0,4 fatalidades por kWh. Esse número é irrisório quando comparado com as usinas térmicas. Dessa maneira, considerando a substituição das termelétricas pelas eólicas, haveria um saldo positivo na vida dos pássaros. Ou seja, a maioria das suas vidas seriam poupadas nessa transição.

3. Área Ocupada

A Figura 18 ilustra a área ocupada por MW de capacidade instalada dos três tipos de usinas comparadas nesses estudo. Para a determinação desses valores foi calculada a média de área ocupada das dez maiores usinas hidrelétricas. E as médias das eólicas e das termelétricas, os foram obtidas de Neto e Vieira (2009) e Nace (2010) respectivamente.

Figura 18 – Ocupação do terreno por unidade de potência instalada



Fonte: Do Autor.

Percebe-se da Figura que o valor médio de ocupação das usinas eólicas é ligeiramente maior que o valor médio de ocupação das UHEs, entretanto apenas 5% dessa área é fisicamente ocupada pelos aerogeradores, sobrando os 95% para aproveitamento do terreno de acordo com as necessidades do dono do local. Já no caso das UHEs aquele terreno ocupado se torna inutilizável. As UTEs possuem a menor área de ocupação. Todavia, esse valor não considera a área utilizada para a mineração do carvão, que além de ser significativa, é extremamente agressiva ao meio ambiente (NACE, 2010).

4. Reflexos dos problemas ambientais na sociedade

O alagamento, proveniente das hidrelétricas, provoca a saída compulsória da população local, desintegrando seus costumes e tradições, além de suas relações com o rio (tipo de agricultura desenvolvida, técnicas utilizadas através da irrigação, regime das cheias e a relação sociocultural). A empresa deve realocar essa população tentando proporcionar uma realidade mais próxima possível da antiga. Entretanto, isso raramente ocorre, pois além de haver o deslocamento forçado ainda há uma compensação financeira irrisória ou inexistente. No caso das tribos indígenas há também uma dificuldade de adequação muito grande, devido à sua relação espiritual com aquelas terras (MENDES, 2005).

Existem relatos de que o represamento também provoca enfermidades endêmicas em comunidades próximas às usinas, dentre elas doenças parasitárias como a esquistos-

somose e a malária e em menor escala a febre amarela e a dengue. Isto ocorre porque as barragens e os sistemas de irrigação formam remansos e propiciam um ambiente favorável para a criação e proliferação de insetos, caramujos e outros animais que servem como vetores para o desenvolvimento de parasitas (Caderno Saúde Coletiva, 2006).

Os gases poluentes emitidos pelas usinas termelétricas são extremamente prejudiciais à saúde humana. A Organização Mundial da Saúde (OMS), divulgou em seu relatório que 80% da população mundial está exposta a poluentes superior aos limites recomendados. Com a piora da qualidade do ar, aumentam os riscos de acidente vascular cerebral, doenças cardíacas, câncer de pulmão e doenças respiratórias crônicas e agudas, sendo que idosos, crianças e portadores de doenças crônicas são as maiores vítimas. Estima-se que 12,6 milhões de mortes no mundo estão associadas à poluição e riscos ambientais (MATSUURA; BAIMA, 2016).

O único relato de incômodo à saúde provocado por uma usina eólica é a poluição sonora, que dependendo da proximidade e exposição pode causar atordoamento, dor de cabeça ou perda de audição. Todavia, apenas trabalhadores das plantas industriais podem ter tais experiências. E ainda podem ser evitadas utilizando-se os equipamentos de segurança apropriados (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

A construção de novas usinas seja hidrelétrica, eólica ou termelétrica, possui o efeito de atrair mão de obra e moradores para regiões menos ocupadas assim como proporcionar o desenvolvimento econômico dessas regiões menos desenvolvidas. Entretanto, usinas hidrelétricas e termelétricas de grande porte são no mínimo 3 vezes maiores que uma usina eólica, e portanto, exigem um planejamento muito bem feito pois podem causar um desenvolvimento muito rápido o qual a região e os cidadãos locais não estão preparados, no que diz respeito à falta de alta de infraestrutura como a falta de escola, moradia, aterro sanitário, capacidade dos hospitais, transporte, aumento da violência, etc.. (MENDES, 2005)

5 Conclusão

Foi com o advento da crise hídrica no Brasil, acarretando no contínuo acionamento das usinas térmicas, no encarecimento do preço de venda de energia e no aumento das taxas de emissão de GEE, que viu-se a necessidade de diversificar a matriz energética.

A partir desse momento, descobriu-se o enorme potencial eólico do país e diversas políticas foram sendo desenvolvidas para fomentar a criação de usinas eólicas. Devido ao caráter emergencial da implantação de novas usinas, o Brasil não considerou necessário o investimento em pesquisas e estudo da tecnologia pois priorizou a importação de indústrias estrangeiras.

O crescimento vertiginoso da utilização da energia eólica na matriz energética brasileira atrelado à falta de conhecimento técnico e falta de mão-de obra especializada implicam em um alto valor de custos operacionais e de manutenção. Além do mais, devido às importações, as turbinas não foram desenvolvidas pensando no clima e vento brasileiros.

Apesar dos custos estarem diminuindo cada vez mais, conclui-se que já poderiam ser muito menores caso houvesse o investimento na industrialização nacional assim como em especialização de mão de obra. Dessa maneira, as turbinas seriam adequadas, captando maior quantidade de energia, e possivelmente tendo maior durabilidade, além de reduzir os custos de O&M e de fabricação dos materiais.

Considerando a atual situação do Brasil, as hidrelétricas ainda continuam sendo a fonte de geração mais lucrativa, visto que apesar de seu custo de investimento ser maior, seu custo operacional é muito menor, seu tempo de retorno é próximo ao das usinas termelétricas e eólicas e sua vida útil é a mais longa, fazendo com que o lucro seja maior e por mais tempo. Além do alto custo de investimento unitário, a construção de UHEs é sempre de grande capacidade, exigindo um capital total e tempo para funcionamento muito elevados. Sendo assim, pode haver dificuldade da viabilidade de tais projetos devido a dificuldade de disponibilidade de recursos financeiros e condições favoráveis de financiamento.

A grande vantagem das usinas eólicas hoje tem sido justamente a necessidade de baixo capital inicial, maior facilidade de financiamento e tempo de funcionamento muito rápido, gerando receita mais rápido. O que torna o investimento em tal fonte acessível inclusive para pequenos empresários.

Um outro critério tão importante quanto a viabilidade econômica é o impacto ambien-

tal relativo àquela fonte. A geração eólica indubitavelmente possui maior vantagem sobre esse critério. A isso justifica-se sua baixa taxa de emissão de gases contribuintes ao efeito estufa, a utilização de fonte renovável, a não necessidade de combustão para a geração e a pequena interferência na fauna e flora local.

As hidrelétricas também utilizam fontes renováveis e não realizam combustão para a geração de energia, porém o impacto ambiental causado pelo alagamento é muito mais agressivo que o da fonte eólica. Além do mais, caso a construção das barragens seja em regiões com muitas árvores, as taxas de emissão de GEE, devido à decomposição do material orgânico, podem ser tão intensas ou até maior que a das termelétricas. Considerando que mais da metade do potencial hídrico inexplorado do país localiza-se na região amazônica, a construção de novas hidrelétricas será muito agressiva ao meio ambiente.

Agregando as características ambientais e econômicas de uma usina eólica, é possível deduzir que o custo benefício da sua implementação é muito alto, visto que o potencial hídrico de fácil acesso está saturado e que o potencial eólico brasileiro é excelente, os preços têm sido cada vez mais competitivos e o impacto ambiental é muito pequeno.

Todavia, a inserção de novas fontes, principalmente fontes intermitentes como a eólica, exigem um planejamento muito bem feito pois o grau de complexidade da rede elétrica aumenta consideravelmente. No modelo atual, a matriz energética é basicamente hidrotérmica, o que significa que em momentos de seca, as termelétricas são despachadas. Com a inclusão das eólicas, surgem problemas como a dificuldade de previsão do vento, reduzindo a confiabilidade da rede pois haverão momentos de geração insuficiente e momentos em que a geração será maior que a demanda. Sabe-se que as bacias eólicas do nordeste são complementares aos períodos de baixa hidrologia, o que significa que a intensidade dos ventos é maior em épocas consideradas secas. Porém, os estudos dos ventos brasileiros são muito recentes e não se sabe se essa complementaridade será suficiente para manter os reservatórios de água cheios e disponíveis nos momentos de pouco vento. Sendo assim, mesmo com a introdução de novas fontes renováveis na matriz, não exclui-se a necessidade de utilização das usinas movidas à combustíveis fósseis.

Devido ao fato da geração eólica ser relativamente nova, estudos muito detalhados sobre todos os impactos ambientais devem ser feitos a priori, seguido da determinação de medidas de mitigação de tais problemas e do acompanhamento contínuo do funcionamento da usina de modo a determinar todos os possíveis impactos e suas intensidades. Mesmo que tais ações acarretem em maiores custos. Estudos e planejamentos responsáveis também devem ser feitos em relação ao impacto dessa geração na rede elétrica. A sinergia da fonte eólica com as demais deve ser avaliada de modo a diminuir ao máximo

a dependência das termelétricas sem diminuir a confiabilidade da rede elétrica. O fato de apenas incluir novas fontes renováveis na matriz energética não torna o país mais sustentável e ambientalmente correto. A implementação deve ser muito bem feita para que o problema seja solucionado e não intensificado.

Algumas sugestões para que o utilização da energia eólica no Brasil seja otimizada, seriam a interligação do sistema elétrico do Brasil com o de outros países. Assim, em momentos de excesso de geração, essa energia poderia ser vendida aos outros países e em momentos de baixa, a energia poderia ser comprada. Sempre priorizando a energia proveniente de fontes renováveis. Também deveria ser investido mais em pesquisa a respeito dos ventos brasileiros de modo a melhorar a tecnologia de previsão e conhecer mais o comportamento dos ventos. De acordo com o resultado da intensidade do vento em cada região, talvez seja possível a implantação de usinas em locais estratégicos, onde houvesse complementaridade das velocidades dos ventos. Há também a necessidade de uma restrição ambiental maior a respeito da implantação de todas as usinas para estimular a utilização daquelas menos agressivas ao meio ambiente.

Referências

- ABDI. *Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil*. [S.l.], 2014. 152 p. Disponível em: <http://www.abdi.com.br/Estudo_Backup/Mapeamento%20da%20Cadeia%20Produtiva%20da%20Ind%C3%A9ria%20E%C3%B3lica%20no%20Brasil.pdf>.
- ANEEL. Sistema de informações georreferenciadas do setor elétrico - sigel. 2015. Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html>>.
- ANEEL. *BIG - Banco de Informações de Geração*. 2016. Acessado: 26-01-2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>.
- ARAÚJO, M. Estudo comparativo de sistemas eólicos utilizando modelos probabilísticos de velocidade do vento. *COPPE/UFRJ*, 1989.
- BNDES. *O setor elétrico*. 2002. 1–21 p. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndespt/Institucional/Publicacoes/ConsultaExpressa/Tipo/Livro/2002127.html>>.
- BNDES. *BNDES divulga novas condições de financiamento a energia elétrica*. 2016. Acessado: 19-01-2017. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br>>.
- BREEZE, P. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. *IRENA*, v. 1, n. 5, p. 223–242, 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080983301000119>>.
- Caderno Saúde Coletiva. Caderno saúde coletiva. UFRJ, 2006. Disponível em: <http://www.cadernos.iesc.ufrj.br/cadernos/images/csc/2006_4/artigos/CSC_NESC_2006-4_Fabiola.pdf>.
- CAMACHO, M. G. et al. The renewable energy market in brazil: Current status and potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, v. 16, n. 6, p. 3786–3802, 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112002079>>.
- CAMPOS, F. *Geração de Energia Eólica a Partir de Fonte Eólica com Gerador Assíncrono Conectado a Conversor Estático Duplo*. Tese (Doutorado) — PUC-SP, 2004.
- CARNEIRO, J. Energia eólica. *Departamento de Física*, 2014. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/22408/1/Energia%20E%C3%B3lica.pdf>>.
- CEMAVE. *Relatório anual de Rotas Aéreas de Aves Migratórias no Brasil*. 2014.
- CEPEL. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. 1. ed. Brasília, DF, 2001. 44 p. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>.
- COLSON, E. Avian interations with wind energy facilities: a summary. *American Wind Energy Association*, p. 77–86, 1995.

- CONAMA. *Resolução no. 001, de 23 de janeiro 1986*. 1986. Acessado: 16-02-2017. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>>.
- CONAMA. *Resolução no. 462, de 24 DE julho 2014*. 2014. Acessado: 04-02-2017. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=703>>.
- CPFL; GESEL. *Panorama e Análise Comparativa da Tarifa de Energia Elétrica do Brasil com Tarifas Praticadas em Países Selecionados, Considerando a Influência do Modelo Institucional Vigente*. p. 397, 2015.
- CRESESB. *Mecanismo de Geração dos Ventos*. 2014. Acessado: 28-01-2016. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=211>.
- Danish Wind Industry Association. *Guided Tour on Wind Energy*. 2006. Acessado: 25-11-2016. Disponível em: <<http://www.windpower.org/en/tour.htm>>.
- DERMOTT, M. M. Texas wind farm uses nasa radar to prevent bird deaths. 2009. Disponível em: <<http://www.treehugger.com/files/2009/05/texas-wind-farm-uses-nasa-radar-prevent-bird-deaths.php>>.
- ELETROBRAS. *PROINFA*. 2010. Acessado: 30-11-2016. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/ProinfA/data/Pages/LUMISABB61D26PTBRIE.htm>>.
- EPE. *Plano Decenal de expansão de Energia 2024*. [S.l.], 2015. 467 p. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/PDEE/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202024.pdf>>.
- FADIGAS, E. A. F. A. *Energia Eólica*. [S.l.]: Manole, 2011.
- FARIA, F. A. M. de et al. Estimating greenhouse gas emissions from future amazonian hydroelectric reservoir. *IOP Science, Environmental Research Letters*, 2015. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/12/124019/pdf>>.
- FOLHAPRESS. *Incentivo a construção de novas termétricas é vetado*. 2016. Acessado: 19-01-2017. Disponível em: <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/nacional/online/incentivo-a-construcao-de-novas-termeletricas-e-vetado-1.1654787>>.
- GABRIELA, M.; PODCAMENI, V. O. N. B. *Sistemas de inovação e energia eólica: A experiência brasileira*. 2014.
- GUERRA, J. B. S. O. A. et al. Future scenarios and trends in energy generation in brazil: supply and demand and mitigation forecasts. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, p. 1–14, 2014. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/jclepro>.
- INATOMI, T. A. H.; UDAETA, M. E. M. *Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos*. USP, 2014.
- IPCC. *Special report on renewable energy sources and climate change mitigation (srren)*. Cambridge University Press, 2012.
- JONG, P. de; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. Economic and environmental analysis of electricity generation technologies in brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, p. 726–735, 2015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112002079>>.

- MACMILLAN, A. *Global Warming*. 2016. Acessado: 24-02-2017. Disponível em: <<https://www.nrdc.org/stories/global-warming-101>>.
- MANWELL, J.; MCGOWAN, J.; ROGERS, A. *Wind energy explained: theory, design and application*. [S.l.]: Wiley, 2009. 577 p.
- MATSUURA, S.; BAIMA, C. *OMS: 80% da população urbana mundial vive sob níveis nocivos de poluição*. 2016. Acessado: 27-02-2017. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/sociedade/sustentabilidade/oms-80-da-populacao-urbana-mundial-vive-sob-niveis-nocivos-de-poluicao-19296625>>.
- MELEK, V. C. *Estudo Comparativo de Viabilidade Econômica entre uma usina eólica e uma usina Híbrida*. 2013. Acessado: 12-12-2016.
- MENDES, N. A. S. *As usinas hidrelétricas e seus impactos: os aspectos socioambientais e econômicos do ressentamento rural de de rosana - euclides da cunha paulista*. Unicamp, 2005.
- MME. *Brasil é o país com melhor fator de aproveitamento da energia eólica*. 2016. Acessado: 10-09-2016.
- MME. *Energia Eólica no Brasil e Mundo*. 2016. Acessado: 28-01-2016. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica+-+ano+ref++2015+\(3\).pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2](http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica+-+ano+ref++2015+(3).pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2)>.
- MME. *Ministério de Minas e Energia*. 2016. Acessado: 28-01-2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>.
- MME. *Resenha Energética Brasileira - 2015*. 2016. Acessado: 26-01-2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>.
- NACE, T. *Wich has bigger footprint, a coal plant or a solar farm*. 2010. Acessado: 25-02-2017. Disponível em: <<http://grist.org/article/2010-11-17-which-has-bigger-footprint-coal-plant-or-solar-farm/>>.
- National Academy of Sciences. *Environmental impacts of wind-energy projects*. National Academic Press, 2007.
- NETO, J. A. R. G. aes; VIEIRA, R. *Energia eólica - atração de investimentos no estado do ceará*. 2009. Acessado: 06-02-2017. Disponível em: <<http://investimentos.mdic.gov.br/public/arquivo/arq1321639117.pdf>>.
- NWCC. *Permitting of wind energy facilities: A handbook*. RESOLVE, National Wind Coordinating Committee, 2011. Acessado: 06-02-2017. Disponível em: <<http://www.nationalwind.org/publications/siting/nwcc1.pdf>>.
- PNE 2030. *Geração Termelétrica - Carvão Mineral*. 2007. Acessado: 23-02-2017. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pne/forms/empreendimento.aspx>>.
- Portal Brasil. *Energia Renovável terá prioridade em financiamentos do BNDES*. 2016. Acessado: 11-12-2016. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2016/10/energia-renovavel-tera-prioridade-em-financiamentos-do-bndes>>.

- Portal Fator Brasil. *Potencial eólico do Brasil é de 500 GW, segundo DEWI*. 2015. Acessado: 10-07-2016. Disponível em: <<http://www.renovaenergia.com.br/pt-br/imprensa/noticias/paginas/noticia.aspx?idn=423>>.
- REIS, L. B. dos. *Geração de Energia Elétrica*. [S.l.]: Manole Ltda, 2011.
- RUNCOS, F. et al. *Geração de Energia Eólica - Tecnologias Atuais e Futuras*. 2010. Acessado: 28-01-2016. Disponível em: <<http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-geracao-de-energia-eolica-tecnologias-atuais-e-futuras-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>.
- SANSIGOLO, C. A. Distribuição de probabilidade de velocidade de potência do vento. *Revista Brasileira de Meteorologia*, p. 207–214, 2005.
- SCHWINTECK, P. C.; NEDDERMANN, B. O mercado brasileiro de energia eólica. *DEWI*, 2012. Acessado: 01-12-2016. Disponível em: <http://www.dewi.de/dewi_res/fileadmin/pdf/publications/Magazin_40/02.pdf>.
- SCR. *Evolução da Energia Eólica no Brasil*. 2016. Acessado: 09-12-2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aneel-essencial/-/asset_publisher/c4M6OIOMkLad/content/evolucao-da-energia-eolica-no-brasil?inheritRedirect=false>.
- SIMIS, A. Análise de viabilidade econômica de projetos de geração eólica no Brasil. 2010.
- SIMOES, V. *O&M para usinas eólicas em operação torna-se um dos maiores desafios para o setor em crescimento no país*. 2015. Acessado: 25-11-2016. Disponível em: <<http://blogenergia.cfa.com.br>>.
- SOVACOOOL, B. Contextualizing avian mortality: A preliminary appraisal of bird and bat fatalities from wind fossil-fuel and nuclear electricity. *Energy Policy*, p. 2241–2248, 2009.
- STANTON, C. The landscape impact and visual design of windfarms. *School of Landscape Architecture*, p. Landscape Publication No. LP/9603, 1996.
- TOMALSQUIN, M. T. Energia renovável: Hidráulica, biomassa, eólica, solar e oceânica. *EPE*, p. 452, 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>>.
- TOMALSQUIN, M. T. Energia termelétrica: Gás natural, biomassa, carvão, nuclear. *EPE*, p. 417, 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-%20Online%2013maio2016.pdf>>.
- TROEN, I.; PETERSEN, E. L. European wind atlas. Riso National Laboratory, 1989.
- TUCHTENHAGEN, P.; BASSO, J.; YAMASAKI, Y. Avaliação do potencial eólico brasileiro no Brasil em 2011. *Ciência e Natura*, p. 390–401, 2014. Disponível em: <<http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/cienciaenatura/article/view/13148>>.
- UFPR. *Movimentos da Terra, Estações*. 2009. Acessado: 28-01-2016. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-1.html>>.

A Payback de uma usina Eólica

Na sua forma de cálculo mais simples (Período de análise simples), o Payback é expresso pela equação da seguinte forma:

$$SP = C_C / E_G P_e \quad (A.1)$$

Onde,

- SP - Período de payback simples ;
- C_C - Custo capital de instalação;
- E_G - Produção anual de energia (kWh/ano)
- P_e - Preço obtido pela eletricidade (R\$/kWh)

De acordo com 2.10, sabe-se que a energia gerada ao ano é dada pela equação

$$E_G = P_I * FC * 8760h/ano \quad (A.2)$$

Onde

E_G - Energia anual gerada

P_I - Potência Instalada

FC - Fator de Capacidade

Dessa maneira utilizando os dados da Tabela 4, para uma usina de 30 MW apresenta-se os dados correspondentes na Tabela 8

Tabela 8 – Dados para cálculo de payback Eólica

Parâmetros	Valor Unitário	Valor para 30 MW
Custo de Investimento	4.200.000 (R\$/MW)	126.000.000 (R\$)
Preço da energia	145,8 (R\$/MWh)	
Fator de Capacidade	43%	

Com isso, sabe-se que

$$E_G = 30MW * 0,43 * 8760h/ano \quad (A.3)$$

Sendo assim a Energia Gerada tem o valor de 113.004 MWh ao ano. Com esse resultado calcula-se o payback segundo a Equação A.4

$$SP = 126.000.000/113.004 * 145,8 \quad (A.4)$$

Obtendo-se um SP de aproximadamente 8 anos.

B Payback de uma usina Termelétrica

Utilizando-se das mesmas equações do Anexo A para uma usina termelétrica de 300 MW com os dados da Tabela 9

Tabela 9 – Dados para cálculo de payback UTE

Parâmetros	Valor Unitário	Valor para 300 MW
Custo de Investimento	6.656.000 (R\$/MW)	1.996.800.000 (R\$)
Preço da energia	124,67 (R\$/MWh)	
Fator de Capacidade	66%	

Tem-se

$$E_G = 300MW * 0,66 * 8760h/ano \quad (B.1)$$

Onde $E_G = 1.734.480MWh/ano$

$$SP = 1.996.800.000/1.734.480 * 124,67 \quad (B.2)$$

Obtendo-se um SP de aproximadamente 9 anos.

C Payback de uma usina Hidrelétrica

Novamente, utilizando-se das mesmas equações do Anexo A para uma usina Hidrelétrica de 300 MW com os dados da Tabela 10

Tabela 10 – Dados para cálculo de payback UHE

Parâmetros	Valor Unitário	Valor para 300 MW
Custo de Investimento	7.328.300 (R\$/MW)	2.171.490.000 (R\$)
Preço da energia	121 (R\$/MWh)	
Fator de Capacidade	55%	

Tem-se

$$E_G = 300MW * 0,55 * 8760h/ano \quad (C.1)$$

Onde $E_G = 1.445.400MWh/ano$

$$SP = 2.171.490.000/1.445.400 * 121 \quad (C.2)$$

Obtendo-se um SP de aproximadamente 12 anos.

D Emissão GEE de várias fontes de geração

A Tabela 19 é a versão original disponível pela IPCC (2012) e indica a taxa e de emissão de $kg.CO_2/MWh$ de todas as fontes de geração do Brasil desde à sua construção até o seu funcionamento.

Figura 19 – Emissão de GEE de várias fontes de geração elétrica do Brasil

Values	Biopower	Solar PV	Solar CSP	Geothermal energy	Hydropower	Ocean energy	Wind energy	Nuclear energy	Natural gas	Oil	Coal
Minimum	-633	5	7	6	0	2	2	1	290	510	675
25th Percentile	18	29	14	20	3	6	8	8	422	722	877
50th Percentile	37	46	22	45	4	8	12	16	469	840	1001
75th Percentile	75	80	32	57	7	9	20	45	548	907	1130
Maximum	360	217	89	79	43	23	81	220	930	1,170	1689
CCS min	-1368								65		98
CCS max	-594								245		396

Nota: CCS = Captura de Carbono e armazenamento, PV = Fotovoltaico, CSP = Energia Solar Concentrada