

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AUGUSTO CAMILLO NOGUEIRA

**TURBINAS DE VENTO CANALIZADO: DESCRIÇÃO E
ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA NA GERAÇÃO DE
ENERGIA EÓLICA**

FLORIANÓPOLIS – SC
JUNHO/2017

AUGUSTO CAMILLO NOGUEIRA

**TURBINAS DE VENTO CANALIZADO: DESCRIÇÃO E
ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA NA GERAÇÃO DE
ENERGIA EÓLICA**

Trabalho de conclusão de curso submetido a
Coordenadoria de Trabalho de Conclusão de
Curso da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Engenheiro Civil.

Área de concentração:
Infraestrutura e energia sustentável

Orientador: Prof. Marcos Aurélio Marques
Noronha, Dr.

FLORIANÓPOLIS – SC
JUNHO/2017

AUGUSTO CAMILLO NOGUEIRA

TURBINAS DE VENTO CANALIZADO: DESCRIÇÃO E ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA NA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Augusto Camillo Nogueira, apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Florianópolis, 23 de junho de 2017.



Prof. Marcos Aurélio Marques Noronha, Dr.
ECV-UFSC (Orientador)



Prof. Luciane Rodhe, Dr.
Coordenadora do Curso

Comissão Examinadora:

Eng.º Eduardo Alexandre Krüger, Mestre
Mestre em Infraestrutura – UFSC

Engº Marcelo Pedroso Curtarelli, Dr.
Centro de Economia Verde – Fundação CERTI

Prof. Marcos Aurélio Marques Noronha, Dr.
ECV-UFSC

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.
ECV-UFSC

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, saúde e bênçãos; aos meus pais que sempre fizeram o máximo – sem medir esforços – a fim de me dar boa educação, com amor incondicional; ao meu irmão pelo incentivo, companheirismo e paciência; aos amigos e colegas que tive ao longo de toda a graduação pela parceria e presença constante e, finalmente, aos mestres e servidores da UFSC pelo esforço e dedicação ofertados para uma educação de excelência ao longo desse período de graduação.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um novo modelo de geração de energia eólica, denominada Turbinas Eólicas Canalizadas (TEC) ou *Ducted Wind Turbines (DWT)*. O presente texto apresenta uma descrição desse conceito e as vantagens dessa recente tecnologia comparada ao sistema de geração de energia eólica tradicional, que utiliza grandes torres e turbinas. Também são discutidos os aspectos que determinam a viabilidade econômica, comparando o custo de implantação com o potencial de geração de energia, bem como sistemas de modelagem computacional para validar o estudo. Além disso, são abordados os principais impactos ambientais negativos gerados através do sistema tradicional operado em grande escala que podem ser mitigados com a utilização dos sistemas TECs. Por fim, são apresentados exemplos de aplicação internacionais em locais onde está sendo utilizada essa nova tecnologia.

ABSTRACT

The present work explores a new model of wind power generation called Ducted Wind Turbines (DWT). It describes this concept and presents the advantages of this new technology compared to the traditional generation system, which uses large towers and turbines. Additionally, it presents a brief analysis on the aspects that determine economic feasibility, comparing the cost of implementation with the potential of power generation, as well as computational modeling systems to validate the study. Also, the main negative environmental impacts generated through the traditional large-scale system that can be mitigated with the use of the TECs systems are addressed. Finally, it presents cases around the world where this technology is being used.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Embarcações egípcias movida pelo vento, 1000 a.C., b) moinho para moagem de grãos (Afeganistão), 945 d.C.; c) antigo rotor de vento chinês para bombeamento de água .	18
Figura 2 – Turbinas de teste em <i>Askov</i> , Dinamarca (1897).....	19
Figura 3 – Turbina de vento <i>Smith-putnam</i> , 1941	20
Figura 4 – Turbina <i>Gedser</i> de 200 KW, 1957	20
Figura 5 – Elevação da tecnologia para a geração de energia eólica.....	21
Figura 6 – Protótipo da <i>Siemens</i> em <i>Osterild</i> , Dinamarca.....	22
Figura 7 – Relação crescimento população mundial e consumo mundial de energia	23
Figura 8 –Capacidade Total Instalada de turbinas eólicas no Brasil.....	26
Figura 9 – Impacto visual relacionado as grandes torres de energia eólica.....	29
Figura 10 – Parques eólicos podem impactar população de pássaros e morcegos.....	32
Figura 11 – Sazonalidade de recurso eólico	37
Figura 12 – Funcionamento aero geradores.....	38
Figura 13 – Sistema de conversão de energia eólica	39
Figura 14 – a) Turbina com eixo horizontal; b) Turbina com eixo vertical	40
Figura 15 – Componentes gerador de eixo horizontal.....	41
Figura 16 – Principais componentes de um aero gerador	42
Figura 17 – Dispositivo para utilizar o poder do vento US 4154556 A	44
Figura 18 – Ilustração da turbina canalizada na horizontal em sua concepção inicial	46
Figura 19 – Lâmina de turbina inserida na área da garganta do Venturi.....	47
Figura 20 – Modelo de fluxo unidimensional	50
Figura 21 – Esquema do sistema com seus principais componentes	51
Figura 22 – Dimensões detalhadas e geometria do <i>INVELOX</i>	53
Figura 23 – Domínios computacionais utilizados em <i>ANYSIS</i> e <i>COMSOL</i>	54
Figura 24 – Perfil de velocidade, corte no eixo de simetria: a) Modelo ANSYS; b) Modelo COMSOL.....	55
Figura 25 – Vista superior dos vetores de velocidade	56
Figura 26 – Sistema de turbina convencional e sistema TEC em <i>Chaska, Minnessota</i>	57
Figura 27 – Melhoria na produção de energia	58
Figura 28 – Caso de múltiplas turbinas	60
Figura 29 – Três geradores de turbinas eólicas instaladas no Venturi	60

Figura 30 – Diferentes designs para utilização das TECs	62
Figura 31 – Sistemas INVELOX instalado no Estado da Virginia	66
Figura 32 – 100KW de geração de energia na Nova Zelândia através do sistema INVELOX67	
Figura 34 – 200KW instalado na Holanda	69
Figura 35 – 200 KW instalado em um telhado na cidade de <i>Spijkenisse</i> , Holanda.....	69
Figura 36 – Sistema 1 SheerWind INVELOX instalado na Guarda Nacional do Exército em Michigan	70
Figura 37 – Sistema 2 SheerWind INVELOX instalado na Guarda Nacional do Exército em Michigan	71
Figura 38 – Instalação do sistema INVELOX na Ilha de Palmyra, ao sul do Havaí.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Contribuição de diversas formas de geração de energia.....	24
Tabela 2 – Fontes de Energia Elétrica no Brasil.....	25
Tabela 3 – Capacidade Instalada e número de parques eólicos no Brasil	27
Tabela 4 – Estrutura de custos de 2 MW turbina eólica típica instalada na Europa (2006 €)	35
Tabela 5 – Especificação dos dispositivos inseridos no experimento TEC.....	57
Tabela 6 – Situação licenças tecnologia INVELOX em todo o mundo	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD – Computational Fluid Dynamics (Fluidodinâmica computacional)

DWT – Ducted Wind Turbine

TEC – Turbina Eólica Canalizada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo Geral do Trabalho	16
1.2	Objetivos Específicos	16
1.3	Estrutura do Trabalho	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Energia Eólica	18
2.1.1	Histórico	18
2.2	Histórico do desenvolvimento das matrizes energéticas	23
2.2.1	Aumento no consumo de energia	23
2.2.2	Cenário Mundial.....	24
2.2.3	Cenário Nacional.....	25
2.3	Impactos ambientais negativos na geração em grande escala	27
2.3.1	Impacto visual	29
2.3.2	Geração de ruído	30
2.3.3	Impacto na vida selvagem	31
2.3.4	Efeitos de cintilação (<i>Shimmer Flicker</i>).....	33
2.3.5	Interferência eletromagnética	33
2.3.6	Requisitos de terra	33
2.3.7	Alterações Climáticas.....	34
2.4	Aspectos técnicos e econômicos	34
2.4.1	Análise da Viabilidade da geração eólica.....	36
2.4.2	Sistemas de geração eólica	38
2.4.3	Eficiência de um sistema completo de energia eólica	39
2.4.4	Classificações	39
2.4.4.1	Componentes de geradores de eixo horizontal.....	40
3	CARACTERIZAÇÃO TURBINAS EÓLICAS CANALIZADAS	44
3.1	Histórico	44
3.1.1	Efeito Venturi	46
3.2	Estado da arte	47
3.3	Simulação	52
3.3.1	Comparativo TEC e Torre Eólica Padrão.....	56

4	O MODELO DAS TECS	59
4.1	Incremento da velocidade e energia gerada.....	59
4.2	Instalação ao nível do solo e redução dos custos	61
4.3	Mitigação de impactos ambientais negativos	61
4.4	Geração distribuída.....	63
5	APLICAÇÃO DAS TECS	64
5.1	EUA, Virginia.....	66
5.2	Nova Zelândia	67
5.3	Irã.....	67
5.4	China.....	68
5.5	Holanda.....	68
5.6	EUA, Dakota do Sul	70
5.6.1	Sistema 1	70
5.6.2	Sistema 2	71
5.7	EUA, Ilha de Palmyra.....	72
6	CONCLUSÕES	73
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de energia elétrica, em razão da era tecnológica e dos altos padrões de consumo, gera complexos problemas, desde os associados à problemática ambiental devido ao massivo uso de combustíveis fósseis, até os de ordem econômica, relacionado ao alto custo de geração de energia. Diante disso, é preciso investir em soluções sustentáveis e trabalhar para uma matriz energética cada vez mais diversificada (*MULLER, BROWN, OLZ, 2011*).

Sistemas de conversão de energia eólica surgiram há mais de três mil anos com os antigos moinhos de vento, para diversas finalidades. O marco inicial para a energia eólica no que diz respeito à conversão de energia elétrica foi ao final do século XIX. Nas últimas três décadas, as turbinas eólicas começaram a se difundir rapidamente devido às crises de energia e mudanças político-sociais. No entanto, a energia eólica está longe do seu potencial e apesar de ser uma fonte de energia eólica expressiva, apresenta uma série de impactos ambientais negativos.

Os fabricantes têm aumentado consideravelmente os ganhos de produção de energia nas últimas décadas. Todavia, esse incremento energético veio acompanhado da construção de turbinas com lâminas cada vez maiores, em torres cada vez mais altas, apresentando alturas superiores a 100 m. Em virtude disso, tem-se aumentado consideravelmente os problemas ambientais associados a esse tipo de geração, e questionada cada vez mais a real eficácia da tecnologia em questão.

Uma recente tecnologia desenvolvida tem se mostrado promissora. Dentro da tecnologia TEC, o sistema patenteado denominado INVELOX, desenvolvida pela empresa norte-americana Sheerwind, baseia-se essencialmente na captação, concentração e na aceleração do vento, produzindo energia limpa em diversas localidades. O novo sistema eólico se destaca em relação às torres tradicionais, uma vez que utiliza turbinas com diâmetros substancialmente menores, além de oferecer uma capacidade de geração maior.

A tecnologia capta o fluxo de vento através de uma entrada omnidirecional, dirige o fluxo dentro de uma seção menor, que acelera passiva e naturalmente seu fluxo devido ao efeito Venturi, possibilitando que as TECs gerem energia em locais com baixa intensidade de ventos, até mesmo na ordem de 1m/s. Essa característica é de fundamental importância, visto que permite ao consumidor instalar o sistema em sua unidade consumidora e troque a energia com a distribuidora local com o objetivo de reduzir o valor da sua fatura de energia elétrica,

ou, no caso de geração de energia excedente, conceda a venda dessa energia para a rede principal, através da geração distribuída, conforme resolução 482/2012 da ANEEL (ANEEL, 2015).

O presente trabalho pretende contribuir a viabilidade desse novo sistema de geração de energia eólica - até mesmo em regiões com baixa intensidade de vento - através de simulações computacionais presentes na literatura, com exposição de dados relativa aos dois sistemas a serem comparados, as TECs e o sistema de geração de energia eólica tradicional, sob as mesmas condições de vento. Além de dissertar sobre os potenciais impactos ambientais negativos atribuídos à geração eólica por meio de turbinas em torres, e como podem ser mitigados a partir da utilização do sistema INVELOX.

1.1 OBJETIVO GERAL DO TRABALHO

Descrever as vantagens, a viabilidade econômica e técnica do novo sistema de TEC, comparado ao método tradicional de geração de energia eólica por meio das torres geradoras, bem como mitigação dos principais problemas ambientais associados ao modelo usual.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Dissertar acerca das vantagens da utilização das Turbinas Eólicas Canalizadas, INVELOX, comparadas à metodologia tradicional de geração, por meio de torres eólicas.
- b) Analisar a viabilidade econômica desses empreendimentos eólicos, em específico.
- c) Avaliar os impactos ambientais gerados a cada aspecto do empreendimento usual de geração e a minoração desses problemas em virtude do uso do sistema em estudo.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado através de 6 (seis) capítulos, dentre os quais o capítulo 1 (um) é introdutório, apresentando uma visão inicial do assunto tratado através de um resumo, as motivações para a sua escolha, assim como os objetivos gerais e específicos do estudo.

O capítulo 2 (dois) introduz o leitor à temática, através de um breve histórico da energia eólica, não apenas no cenário atual mundial, como também, no Brasil. Apresentando juntamente o aumento substancial no consumo de energia das últimas décadas e a necessidade de novas tecnologias eficazes e sustentáveis. Além disso, descreve os impactos ambientais negativos relacionados à geração em grande escala do sistema convencional, os aspectos técnicos e econômicos da tecnologia no qual o estudo será feito.

O capítulo 3 (três) caracteriza o modelo TEC INVELOX através de simulações computacionais, expondo suas características técnicas de design e, como principais diferenças e vantagens, comparando ao sistema tradicional de geração de energia eólica através de torres.

O capítulo 4 (quatro) apresenta o modelo das TECs, com as suas principais características associadas ao incremento da velocidade e energia gerada, à instalação ao nível do solo e redução de custos, à mitigação dos impactos ambientais negativos oriundos do dispositivo com turbinas em torres, assim como a oportunidade de geração distribuída.

O capítulo 5 (cinco) apresenta a aplicação das TECs, os locais que já estão sendo empregadas, os que possuem licenças autorizadas para implementação e os que estão em fase de aprovação. Além disso, elenca alguns locais onde foram instalados o dispositivo INVELOX ao redor do mundo, destacando as principais características de cada um deles.

Por fim, o capítulo 6 (seis) apresenta as principais conclusões extraídas da elaboração do estudo através das considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

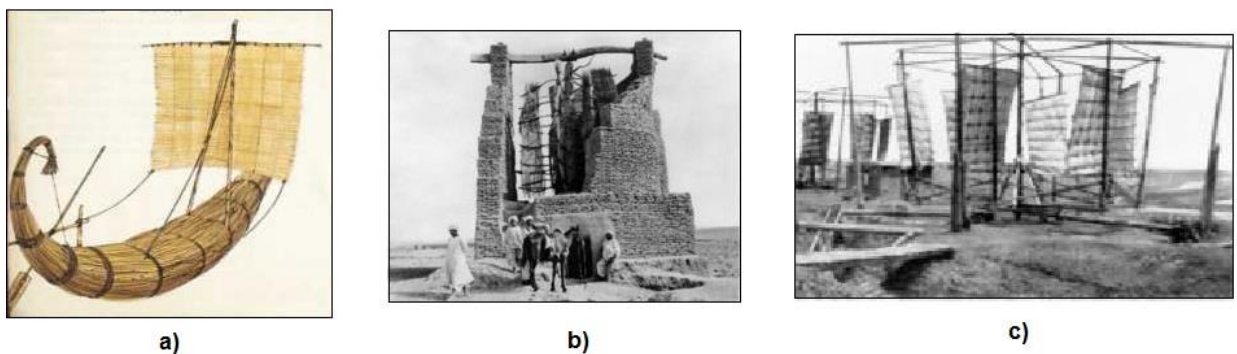
2.1 Energia Eólica

Energia eólica pode ser definida como a energia cinética das correntes de ar que circulam na atmosfera. A geração de energia elétrica através dos ventos ocorre através da conversão da energia cinética de translação pela energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas (FARIAS, 2016).

2.1.1 Histórico

Acredita-se que sistemas de conversão de energia eólica surgiram há mais de três mil anos com os antigos moinhos de vento que facilitaram extremamente o desenvolvimento agrícola, embora o aproveitamento dos ventos para geração de energia elétrica seja recente (FARIAS; SELLITTO, 2011). Na antiguidade, as sociedades empregavam moinhos de vento, objetivando a moagem de grãos e a irrigação, através do bombeamento de água (DUTRA, 2011). Além disso, a energia eólica foi utilizada para determinadas funções, como mover barcos usando vela, refrigerar casas por circulação de ar externo, bem como pequenas instalações de produção. A figura 1 (um) mostra algumas utilizações práticas do vento ao longo da história.

Figura 1 – a) Embarcação egípcia movida pelo vento, 1000 a.C.; b) moinho para moagem de grãos (Afeganistão), 945 d.C.; c) antigo rotor de vento chinês para bombeamento de água.



Fonte: Egito (2015); Diaz (2012, p.27); Diaz (2012, p.28)

O marco inicial para a energia eólica no que diz respeito à conversão de energia elétrica foi o final do século XIX. Na Dinamarca, no período de 1891-1908, *Poul la Cour* desenvolveu um projeto de pás de rotor aerodinamicamente eficientes, como demonstrado na figura 2 (dois), possibilitando que em 1918, cerca de 3% do consumo de eletricidade dinamarquês fosse coberto por turbinas eólicas, que produziam eletricidade através de um dínamo na torre. A partir da década de 1920, a geração era por meio de hélices de avião modificadas para conduzir geradores de corrente contínua. No entanto, no período seguinte, a produção de energia eólica ficou obsoleta devido ao barateamento dos combustíveis fósseis (*SORENSEN*, 2010).

Figura 2 – Turbinas de teste em *Askov*, Dinamarca (1897)



Fonte: Museu *Poul la Cour* (2017)

Devido às crises de abastecimento, o interesse na energia eólica foi renovado durante a Segunda Guerra Mundial. A partir disso, foi desenvolvida a máquina americana de 1,25 MW *Smith-Putnam* (Figura 3), construída com um conceito baseado em um rotor com regulação do *stall* e o uso de aerofólios modernos.

Figura 3 - Turbina de vento *Smith-putnam*, 1941



Fonte: Science Photo Library, 2014

Essa tecnologia foi a que resultou na elaboração da turbina de *Gedser* em 1957 (Figura 4). Essas turbinas foram protótipos para a nova geração de turbinas após a crise do petróleo em 1973, e possibilitou investimentos em projetos de geração de eletricidade a partir do vento por diversos países. Isso formou a base para o que é uma indústria de negócios globais que possuem volume de mais de 50 bilhões de dólares e taxa de crescimento em torno de 20%.

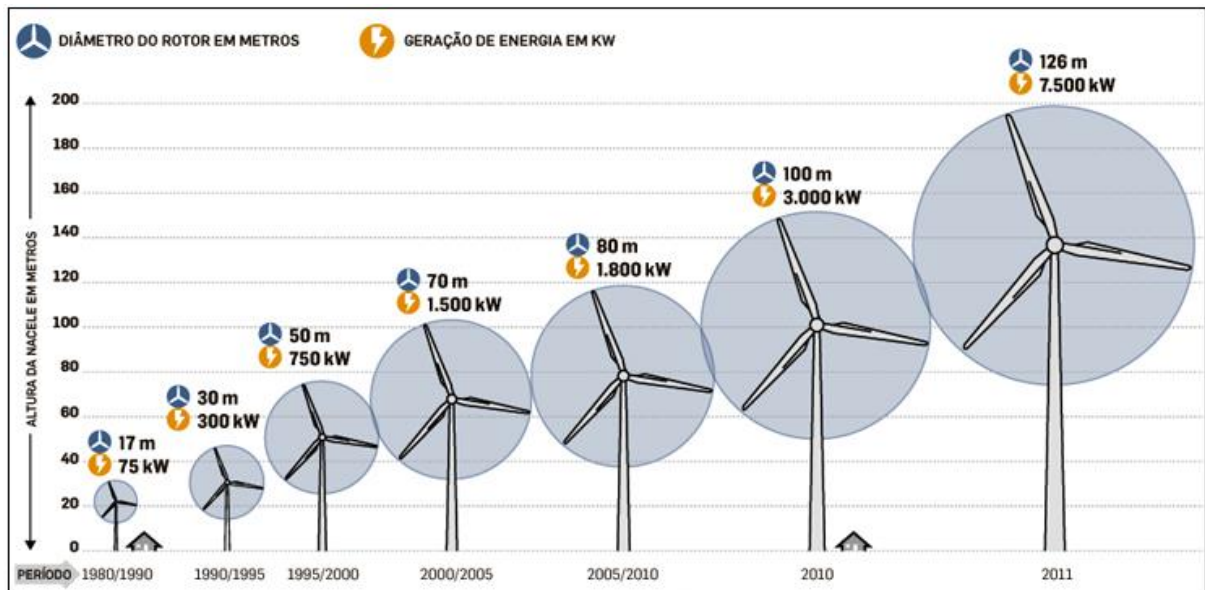
Figura 4 – Turbina *Gedser* de 200 KW, 1957

Fonte: Wind Farm Design 2017

Na década de 70, os Estados Unidos iniciaram suas pesquisas em modelos de eixo vertical e horizontal, tendo em vista o aumento de aerogeradores de pequeno porte. Nas últimas três décadas, devido a crises de energia e mudanças político-sociais, as turbinas eólicas começaram a se espalhar rapidamente por toda parte do planeta e, com isso, verificou-se um aumento rápido e exponencial no desenvolvimento dessa tecnologia.

Embora a indústria de turbinas eólicas tenha feito grandes avanços no aumento da capacidade de potência, chegando a 5MW de potência instalada, aumentando os diâmetros do rotor podendo chegar até 120 metros e aumentando as alturas da torre, o tempo de inatividade excessivo e os custos de operação e manutenção têm desacelerado o crescimento da energia eólica em todo o seu potencial (ALLAEI; TARNOWSKI; ANDREPOULOS, 2015). Portanto, a competitividade da energia eólica pode ser melhorada através da redução de custos, colaboração com tecnologias complementares e novo *design* aerodinâmico inovador para redução do tamanho, já que as perspectivas futuras são de torres e turbinas em tamanhos impraticáveis a fim de manter a energia eólica competitiva, como mostra a figura 5.

Figura 5 – Evolução da tecnologia para a geração de energia eólica.



Fonte: IEA, 2012

Atualmente, já existem turbinas eólicas com capacidade de 8 MW e um rotor de 164 m de diâmetro, com cerca de 200 metros de altura total, considerando a torre, como o caso do SWT-7.0, protótipo da *Siemens* instalado na Dinamarca, conforme figura 6 (BVA BIELEFELDER, 2016). O próximo protótipo, projetado para ser testado este ano, terá rotor de 200 m de diâmetro.

Figura 6 – Protótipo da *Siemens* em *Osterild*, Dinamarca



Fonte: *SIEMENS*, 2017

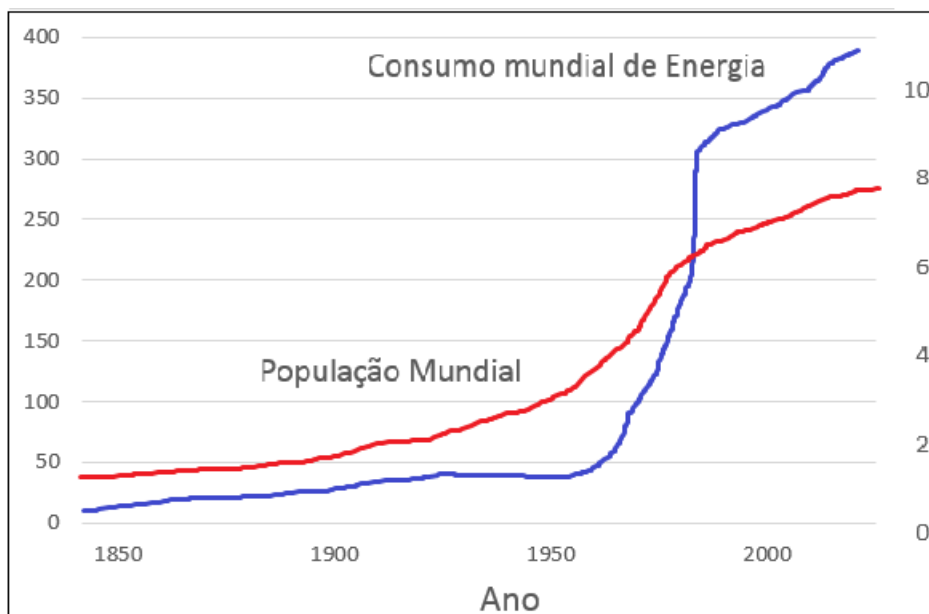
2.2 Histórico de desenvolvimento das matrizes energéticas

2.2.1 Aumento no consumo de energia

Embora o ritmo do crescimento populacional no mundo esteja em constante declínio, a população mundial continua aumentando. Em 1930, o mundo era habitado por 2 bilhões de pessoas. Na década de 1980, cinco décadas depois, ultrapassou a marca de 5 bilhões de pessoas. Atualmente, esse número já é de 7 bilhões, com previsão de atingir 10 bilhões em 2050 (OSWALDO, GOLDEMBERG, 2009).

Além do crescimento populacional, aumentou-se exponencialmente o gasto energético devido ao alto padrão de consumo. Devido ao advento de cada vez mais tecnologias, o crescimento energético foi ainda maior. No Brasil, o consumo de energia cresceu o dobro do avanço populacional entre 2006 e 2010. A figura 7 demonstra a relação entre o crescimento populacional e o consumo mundial de energia nos últimos dois séculos.

Figura 7 – Relação crescimento população mundial e consumo mundial de energia



Fonte: Cooks, 2012

Ainda assim, de acordo com a Agência Internacional de Energia mais de 1,3 bilhão de pessoas no mundo não tem acesso à eletricidade. Assim sendo, as energias renováveis são essenciais para alterar a matriz energética tipicamente de combustíveis fósseis para soluções sustentáveis e ambientalmente amigáveis. Aliado a isso, uma energia confiável e econômica é fundamental para melhorar a qualidade de vida em países subdesenvolvidos onde há pouco ou nenhum acesso à energia.

2.2.2 Cenário Mundial

Com a crise do petróleo, na década de 1970, houve investimento massivo para buscar novas alternativas, com o intuito de diminuir a dependência dos combustíveis fósseis na geração de eletricidade. Somado a essa questão de busca pela diversificação da matriz energética, há o ponto ambiental, uma vez que os combustíveis fósseis são responsáveis por significativa parcela no aumento de emissão dos gases causadores de efeito estufa e as energias renováveis aparecem como tecnologias determinantes na minimização dessa problemática ambiental.

Apesar do incentivo por fontes sustentáveis na geração de energia, como à oriunda da força dos ventos, verifica-se, ainda, enorme dependência dos combustíveis fósseis para geração de eletricidade, como demonstrado na Tabela 1, FIESP (2010).

Tabela 1 – Contribuições de diversas formas de geração de energia

Geração de Energia Elétrica no Mundo		
Fonte	1980	2009
Fóssil	69,30%	66,16%
Hidrelétrica	23,50%	17,11%
Nuclear	6,90%	13,83%
Eólica e Solar	0,20%	2,00%
Biomassa	0,10%	0,90%

Fonte: FIESP, 2010

Mesmo com a crise petrolífera, ainda na década de 1980, a contribuição da energia eólica para a geração de energia elétrica, na matriz energética mundial, era insignificante. Na década seguinte, aumentaram os investimentos por fontes alternativas devido a maior preocupação ambiental, e isso ainda é um grande impulso à expansão da energia eólica. Em 1990, a potência eólica instalada no mundo era inferior a 2 GW e no final da década, precisamente em 1998, atingiu os 10 GW de geração. De acordo com o Relatório Global do Mercado Eólico (2016), elaborado pelo Conselho Mundial de Energia Eólica (*GWEC*), cerca de 54,6 *giga watts* de energia eólica foram instalados no mundo em 2016, levando a capacidade total acumulada no final daquele ano a 468,6 GW.

2.2.3 Cenário Nacional

O ano de 2016 foi emblemático para a indústria eólica brasileira. O país chegou ao marco de 10 GW em instalações, representando cerca de 7% da capacidade nacional de geração (Tabela 2). O Brasil tem um dos melhores recursos eólicos do mundo, o que excede em até três vezes as necessidades atuais de eletricidade do país. No ano passado, foram instaladas 947 turbinas em parques eólicos, com um investimento de 5,4 bilhões de dólares, representando 78% do investimento total em energia limpa no país (*GWEC*).

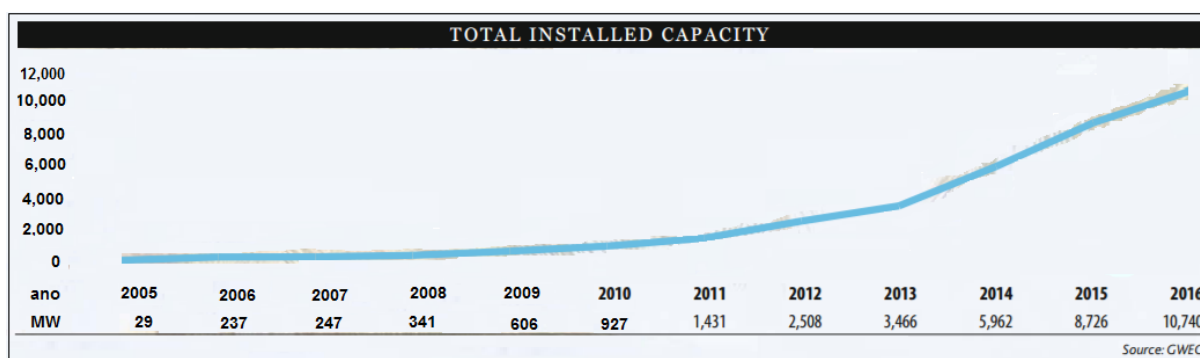
Tabela 2 – Fontes de Energia Elétrica no Brasil

Geração de Energia Elétrica no Brasil	
Fonte	2016
Fóssil	18,11%
Hidrelétrica	64,57%
Nuclear	1,34%
Eólica e Solar	6,53%
Biomassa	9,45%

Fonte: ANEEL, 2016

O setor representa um investimento total de R\$ 70 bilhões, empregando 160 mil pessoas, fornecendo eletricidade para cerca de 17 milhões de casas e ainda reduzindo, em torno de 16 milhões de toneladas por ano, a emissão de gases causadores de efeito estufa. Apesar do crescimento na capacidade total instalada nos últimos dez anos - como observado na Figura 6 - a falta de demanda devido às crises econômicas, linhas de transmissão insuficientes e financiamentos são as principais barreiras ao desenvolvimento da energia eólica no Brasil atualmente.

Figura 8 – Capacidade Total Instalada de turbinas eólicas no Brasil



Fonte: Global Wind Energy Council (GWEC), 2016

A falta de demanda acabará assim que o mercado voltar a crescer, ou ainda com uma pequena crise no setor hidroelétrico. Com isso, é importante ter uma base de energia eólica estruturada para suprir essa exigência. A falta de linhas de transmissão é um severo problema para essa indústria. Os principais estados geradores – Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul e Bahia (Tabela 3) – provavelmente não poderão participar de leilões futuros devido à falta de capacidade de transmissão.

Tabela 3 – Capacidade Instalada e número de parques eólicos no Brasil, 2016.

Estado	Capacidade Instalada (MW)	Número de parques eólicos
Rio Grande do Norte	3,420	125
Bahia	1,898	73
Ceará	1,789	68
Rio Grande do Sul	1,695	72
Piauí	915	33
Pernambuco	651	29
Santa Catarina	239	14
Paraíba	69	13
Sergipe	35	1
Rio de Janeiro	28	1
Paraná	3	1
Total	10,742	430

2.3 Impactos ambientais negativos na geração em grande escala

A energia eólica é uma boa forma de energia renovável, uma vez praticamente não há emissão de gases causadores do efeito estufa com o uso dessa forma de energia durante a operação do sistema. Todavia, recentes estudos apontam que essa tecnologia produz uma série de impactos ambientais negativos e, a cada ano, surgem novas pesquisas apontando novos impactos maléficos e embasando os estudos já existentes (HODGE, 2017).

A norma ABNT ISO 14001 estabelece que uma organização deve identificar e avaliar os impactos que podem ser ocasionados através da implementação de uma determinada atividade (SOUZA, 2009). Essa análise deve abranger todas as atividades e interações com o meio ambiente e os critérios de avaliação dos impactos ambientais devem ser claros e coerentes, de modo que os embates mais significativos sejam reconhecidos e avaliados de acordo com a sua influência requerendo, assim, algum tipo de ação que previna essa ocorrência (DERISIO, 2007).

Como forma de viabilizar economicamente o uso da energia eólica, foi necessário o advento de turbinas cada vez maiores. Em uma grande turbina de vento, o gerador pode ser 100 vezes maior que o utilizado na década de 1980. Com relação ao tamanho da pá, o aumento foi em torno de 8 (oito) vezes no mesmo período, variando entre 50 a 100 m o diâmetro do rotor em turbinas modernas (*EDENHOFER, PICHES, SOKONA, 2012*).

Com peças constituintes cada vez maiores dos seus componentes, aumentam os impactos inerentes das turbinas eólicas, sendo sempre limitado ao ambiente imediato. Alguns problemas podem ser um grande aborrecimento na vida das pessoas, como o ruído causado pela operação, bem como seu impacto visual gerando distúrbios e desconforto sonoro aos indivíduos. (*ABBASI, PREMALATHA, 2014*).

Além da problemática nos parques eólicos em terra, existem ainda adversidades relacionadas à produção *offshore*. As instalações desses parques têm sérias implicações para a vida marinha (*DAR ERVIN, 2016*). Há também evidências de que os impactos adversos de usinas eólicas na fauna - sobretudo para pássaros e morcegos - sejam ainda maiores no que se refere à mortalidade de animais por turbina. Como observado em estudos nos Estados Unidos e Canadá, a instalação de energia eólica em escala tem impacto diretamente no decréscimo na população de morcegos, com alto índice de letalidade onde existem parques eólicos (*ARNETT, BAERWALD, 2013*).

O zumbido de uma turbina de vento foi o primeiro impacto ambiental adverso da energia eólica que surgiu. Posteriormente, o impacto visual das grandes torres, em decorrência de uma mudança marcante no cenário usual, apareceu como segunda problemática. O terceiro grande impacto tem sido o dano causado a pássaros e morcegos que são dilacerados em voos quando passam por turbinas eólicas. Além disso, ainda há a interferência nas ondas de televisão e a destruição causada por sombras tremeluzentes. Ainda que esses problemas apresentados sejam expressivos, a principal problemática pode ser caracterizada como o provável impacto dos grandes parques eólicos sobre o clima, uma vez que altera a disposição das chuvas (*ABBASI, PREMALATHA, 2014*).

2.3.1 Impacto visual

Em diversos estudos houve uma dicotomia relacionada à opinião pública sobre a energia eólica. Embora a maioria perceba esse tipo de geração de energia como benigna e desejável, existe uma percepção negativa quanto à proximidade física das turbinas (*Devine-Wright, 2004*). Com o progressivo aumento do tamanho das turbinas eólicas para maior geração de energia, o domínio sobre as paisagens e a extensão de sua visibilidade aumentam proporcionalmente (*Langbroek, Vanclay, 2012*). A figura 9 (nove) demonstra a mudança na paisagem natural com a implantação dessas grandes torres. Diante disso, amplia a resistência pública frente à instalação de turbinas eólicas próximas a população e dentro da distância de visualização (*Lothian, 2008*).

Figura 9 – Impacto visual relacionado as grandes torres de energia eólica



Fonte – *Stan Shebs, 2014*

Estudos indicam a abrangência na área de influência visual dessas turbinas. *Bergsjö A., Nilsson K. e Sharback E. (1982)* identificaram quatro zonas de influência visual:

- Zona de varrimento, definida pelo raio da pá do rotor;
- Zona de intrusão visual na qual uma unidade é percebida como visualmente intrusiva e é de cerca de 5 (cinco) vezes a altura total da unidade;
- Zona de dominação visual limitada pela distância máxima à qual a torre da turbina domina o campo de visão, sendo cerca de dez vezes a altura da torre;

- Zona de visibilidade dentro da qual a unidade pode ser vista facilmente, percebida como pertencente à paisagem distante, estendendo-se a cerca de 400 vezes a altura da unidade.

Outro fator relacionado à percepção visual das turbinas eólicas é a relação com a sua funcionalidade, quando as matrizes da turbina estão ociosas, na maior parte do tempo, o espectador atribui uma imagem negativa, de que essa tecnologia é ineficiente e gera um ônus para o contribuinte (*Thayer, Freeman, 1987*). Além disso, estudos indicam que a classificação de uma linha de turbinas eólicas modernas é considerada com a mesma ordem de negatividade que uma linha de energia elétrica comum (*Ferber, 1977*).

2.3.2 Geração de ruído

Diferente do aspecto visual, em que é mensurado unicamente pela percepção dos indivíduos, o ruído é quantificado de forma mais precisa através da escala de decibéis. O ruído que emana de uma turbina em funcionamento pode ser considerado como uma distração se ouvido em um breve período. Entretanto, suportado dia após dia, causa irritabilidade e é passível de causar alguns distúrbios (*Abassi, Premalatha e Abbassi, 2014*).

As turbinas geram dois tipos de som, um devido à mecânica e outro, aerodinâmico. O ruído mecânico é causado pelas partes eletromecânicas móveis da máquina tendo como principais fontes a caixa de engrenagens, o gerador elétrico e os rolamentos do eixo principal. Já o ruído aerodinâmico consiste da rotação e turbulência, que se torna ainda mais dominante à medida que aumenta o tamanho das turbinas eólicas (*Pedersen, Wayne, 2004*), o que vem ocorrendo cada vez mais para aumento da *performance*.

Estudos indicam que a magnitude da potência sonora de turbinas eólicas em funcionamento, a uma velocidade de vento de 8 m/s, gira em torno de 100 Db (*Bakker et al., 2012*). Embora o transtorno em decorrência dessa magnitude sonora não seja expressivo para outras fontes como tráfego rodoviário, o som da turbina é modulado pelo ritmo das pás do rotor, que dá um tom mais rítmico e perturbador do que um som uniforme (*Piccolo, Ruthler, Pampinelli, 2014*).

A problemática do ruído não é somente devido ao desconforto sonoro, existem estudos que indicam impactos na saúde humana. Segundo *Bakker et. al. (2012)*, a exposição sonora à turbina pode estar relacionada a distúrbios do sono e transtornos psicológicos. Embora nas

últimas décadas foram desenvolvidos esforços de pesquisa com o intuito de aumentar a potência e, assim, reduzir as cargas mecânicas das lâminas e por conseguinte o ruído dinâmico, o sucesso foi da ordem de apenas 10%, comparado ao ruído gerado pelas turbinas eólicas no início dos anos oitenta (Abbasi, Premalatha, 2014).

2.3.3 Impacto na vida selvagem

No final da década de 80, apareceram os primeiros estudos associados ao dano que os parques eólicos causam na vida selvagem, especialmente em pássaros e morcegos. Nos estudos de Howell, Donato (1991) em *Altamont Pass*, Califórnia, as Águias-do-Norte colidiam com as turbinas no momento em que se reuniam para se alimentar, enquanto que em Navarra na Espanha, as turbinas eólicas eram instaladas nos estrangulamentos topográficos, local por onde os pássaros faziam sua migração e geralmente colidiam com as turbinas (Barrios, Rodriguez, 2004).

A vida selvagem não é impactada somente de forma direta, existe uma série de colisões indiretas. De acordo com Carrete, Zapata, Benítez, Lobón e Donázar (2012) há ainda o impacto relacionado à instalação e funcionamento de turbinas eólicas, a destruição do habitat, a redução do sucesso reprodutivo e a mudança nas equações predador-presa. A relevância da mortalidade relacionada a colisões pode ser decisiva, visto que estudos indicam que alguns parques eólicos causaram mortes suficientes para ter pelo menos um efeito de nível local em aves de rapina (Thelander, Smallwood, 2007) e aves marinhas (Everaert, Stienen, 2007).

Mesmo que as aves mudem seu deslocamento migratório com o intuito de não passar pelas turbinas eólicas, isso resulta em seres que abandonam seu habitat natural, reduzindo drasticamente o número de sua população no local. De acordo com Garvin et al. (2011), o número de aves de rapina após a instalação de parques eólicos, reduziu em 47% em Wisconsin, EUA, em decorrência do abandono dessas aves do seu habitat. Além disso, estudos evidenciam que os desenvolvimentos de parques eólicos podem resultar em reduções significativas na abundância de algumas aves reprodutoras em até 50% a menos numa distância radial de 500 metros das turbinas (Pearce-Higgins et al., 2009).

O declínio populacional de espécies tem impacto não somente local como também transcontinental. (Voigt, Popa-Lisseanu, Niermann e Lramer-Schadt, 2012) avaliaram que espécies de morcegos de origem escandinava eram mortos, no verão e no outono, nas turbinas

eólicas alemãs. Isso evidencia que a instalação de turbinas causa declínio nas populações de morcegos em grande escala geográfica.

Figura 10 – Parques eólicos podem impactar população de pássaros e morcegos



Fonte – Tackk, 2017

2.3.4 Efeito de cintilação (*Shimmer Flicker*)

Esse problema está associado somente à geração de energia eólica. As lâminas de uma turbina de vento lançam uma sombra quando a luz solar ou de alguma outra fonte de luz forte incide sobre elas. Dependendo da luz incidente e intensidade, a cintilação pode causar sentimentos considerados de indesejáveis a insuportáveis para as pessoas próximas à instalação (*Katsaprakakis, 2012*). Durante o nascer e pôr do sol, a sombra de uma lâmina de turbina de 22 metros pode ser visível até uma distância de 4,8 km. Ao anoitecer, a cintilação atrapalha motoristas, podendo ocorrer acidentes (*Lima, Ferreira, et. al, 2013*). O problema da cintilação pode ser solucionado reduzindo a velocidade da lâmina, limitando em no máximo três passes de lâmina por segundo, ou 60 rpm, o que não é viável economicamente, uma vez que reduz consideravelmente a eficiência da turbina.

2.3.5 Interferência eletromagnética

As turbinas eólicas podem causar interferências eletromagnéticas de duas formas. A primeira é distorcendo as transmissões de estações de rádio e televisão existentes e ainda, gerando sua própria radiação eletromagnética (*Binopoulos, Haviaropulos, 2006*). Tal fato decorre em consequência da distorção dos sinais de transmissão ao passar pelas lâminas móveis de turbinas eólicas. Em alguns locais, existe regulamentação para que parques eólicos fiquem a uma distância mínima de torres de transmissão ou estações de rádio e televisão. Sendo assim, mais uma restrição frente a possíveis localizações de parques eólicos.

2.3.6 Requisitos de terra

Com o número de parques eólicos aumentando substancialmente para atingir as metas estipuladas, será cada vez mais difícil encontrar grandes áreas para implantação dessas tecnologias sem entrar em conflito com o uso de terra existente ou, sobretudo, com o meio ambiente (*Katsaprakakis, 2012*). Além disso, pode atenuar a perda de água na irrigação, e também modificar a temperatura, aumentando-as abaixo do vento, tendo impacto direto na produção agrícola.

2.3.7 Alterações climáticas

Os fluxos de vento na Terra influenciam fluxos de energia através do calor e da umidade que transportam, sendo que o fluxo descendente médio de energia cinética que incide sobre a superfície terrestre global é de cerca de $1,5 \text{ kW m}^{-2}$. Em torno de 1 kW m^{-2} desse fluxo de energia cinética é extraído por *arrays* de turbinas eólicas altas e grandes, (Buckley, Snodin, Gardner, 2005). Isso pode alterar a disposição de chuvas local, podendo ter um efeito em cascata sobre a dinâmica atmosférica.

A partir de análises de dados de satélite para o período de 2003-2011, Zhou, Tian, Thorncroft, Bosart e Hu (2012) realizaram estudos sobre uma região do Texas, onde estão localizados quatro dos maiores parques eólicos do mundo, e encontraram uma tendência de aquecimento da ordem de até $0,72^\circ$ graus por década, especialmente durante a noite na região dos parques eólicos em relação às regiões nas proximidades. No mesmo sentido, Wang e Prinn (2010) simularam os potenciais efeitos climáticos associados à instalação de geradores de energia eólica em grandes áreas de terra ou no oceano costeiro. A utilização de turbinas para atender a 10% da demanda global de energia, como proposto pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), poderia causar um aquecimento superficial na ordem de 5 graus Celsius em instalações terrestres. Além disso, podem ocorrer alterações nas distribuições globais de chuvas e nuvens.

2.4 Aspectos técnicos e econômicos

Ainda que a capacidade de geração das turbinas eólicas tenha aumentado substancialmente, o custo de geração ainda é alto, comparado a outras fontes. Este fator está associado ao alto custo de fabricação do equipamento, em especial o aerogerador. Aspectos relacionados à baixa densidade energética, bem como a eficiência reduzida do dispositivo de geração, exigem uma grande área de para captação dos ventos, resultando no preço final de geração de até 1.000 US\$/KW, para a tecnologia em análise (KRUGER, 2016).

Além do alto custo de aquisição e instalação do equipamento, essa tecnologia demanda pessoal extremamente qualificado para a operação e manutenção do equipamento. Não só pela complexidade tecnológica, mas também, pela elevada altura em que são instalados os aerogeradores. Ainda que desnecessária a utilização de combustível para operar, o custo do investimento ainda é maior comparado a outras fontes.

De acordo com *Tourkollas, Mirasgedis (2011)*, a maioria dos investimentos são concentrados na fase inicial do projeto, já que o custo do equipamento equivale a 75% do investimento total de um parque eólico. A tabela 4 (quatro) mostra a estrutura típica de custos para uma turbina de 2 MW construída na Europa (EWEA, 2010).

Tabela 4 – Estrutura de custos de 2 MW turbina eólica típica instalada na Europa (2006 €)

Item	Investimentos (€ 1,000 / MW)	Participação (%)
Turbina	928	75.6
Fundação	80	6.5
Instalação Elétrica	18	1.5
Ligação à rede	109	8.9
Sistemas de controle	4	0.3
Consultoria	15	1.2
Terreno	48	3.9
Financeiro e legal	15	1.2
Estrada	11	0.9
Total	1,227	100

Fonte: EWEA, 2007

É difícil precisar o custo total exato para geração de energia eólica em larga escala, considerando desde a sua construção, operação e manutenção, uma vez que depende de uma série de variáveis. Os valores dependem da sua localização, tamanho e quantidade das turbinas, da tecnologia empregada, além da influência de incentivos (KRUGER, 2016).

2.4.1 Análise de Viabilidade da geração eólica

O primeiro passo para a determinação da viabilidade do uso do recurso eólico é a avaliação do potencial de uma região. A topografia influencia a velocidade do vento em um local específico, bem como sua frequência e distribuição (SILVA et al., 2006). Um dos principais fatores para a determinação da viabilidade do potencial de geração é a relação cúbica com a velocidade do vento (KRUGER, 2016). A equação 1 (um) demonstra como é a potência gerada por um aerogerador:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (1)$$

Onde:

P é a potência extraída pelo dispositivo (W);

ρ é a massa específica do ar ($1,225 \text{ kg/m}^3$);

C_p é o coeficiente de potência do gerador;

A é a área varrida pelas pás do rotor (m^2);

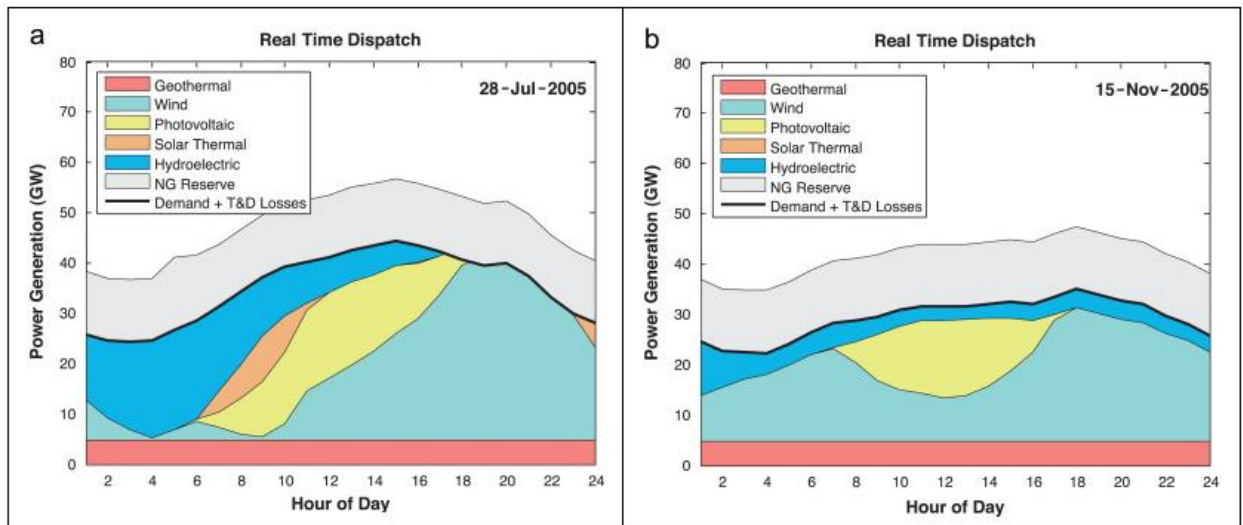
V é a velocidade do vento (m/s).

Além do fato de a potência produzida por um aerogerador ser diretamente associada à velocidade do vento no local, como é possível observar através da equação 1 (um), as massas de ventos locais são influenciadas pela natureza da superfície do terreno, como rugosidade, obstáculos e orografia. Quanto maior a irregularidade do terreno, maior será a desaceleração do vento próximo à superfície. Além da rugosidade, obstáculos como vegetação e construções acarretam a redução da velocidade do vento e aumento da turbulência. Por fim, ventos próximos a cumes de montanhas aceleram; enquanto próximo a vales, desaceleraram (FADIGAS, 2011).

Após escolhido o local onde será instalado o sistema de geração de energia eólica, inicia-se o projeto do parque com o intuito de maximizar a produção, minimizar o custo operacional, além de considerar os possíveis impactos ambientais, assim como aspectos construtivos e legais (COIMBRA, 1999). Ademais, deve-se considerar, na realização do projeto, a variação na disponibilidade do recurso que geralmente não corresponde ao padrão de demanda. De acordo com *Delucchi, Jacobson*, a energia eólica produz uma saída variável de vento e deve avaliar se tais suprimentos podem oferecer fontes confiáveis de energia elétrica segundo a segundo, sazonalmente e anualmente. Como resultado, haverá momentos em que uma única instalação não poderá fornecer energia suficiente para atender à demanda ou produzirá carga excedente, sendo de suma importância a conexão do sistema na rede de distribuição. (*PALUTIKOF et al. 1990*).

A figura 11 (onze) ilustra a natureza estocástica da energia eólica a partir de uma simulação realizada na Califórnia durante dois dias distintos no ano, bem como a de outras fontes de energia. Diante disso, é importante a utilização de fontes complementares para ajudar a fornecer a demanda de correspondência. A natureza complementar de diferentes recursos de energia renovável pode ser aproveitada para combinar a exigência de energia horária. Por exemplo, nos momentos em que não tiver fortes ventos, o sol geralmente está com forte incidência e vice-versa (NAERC, 2009).

Figura 11 – Sazonalidade do recurso eólico

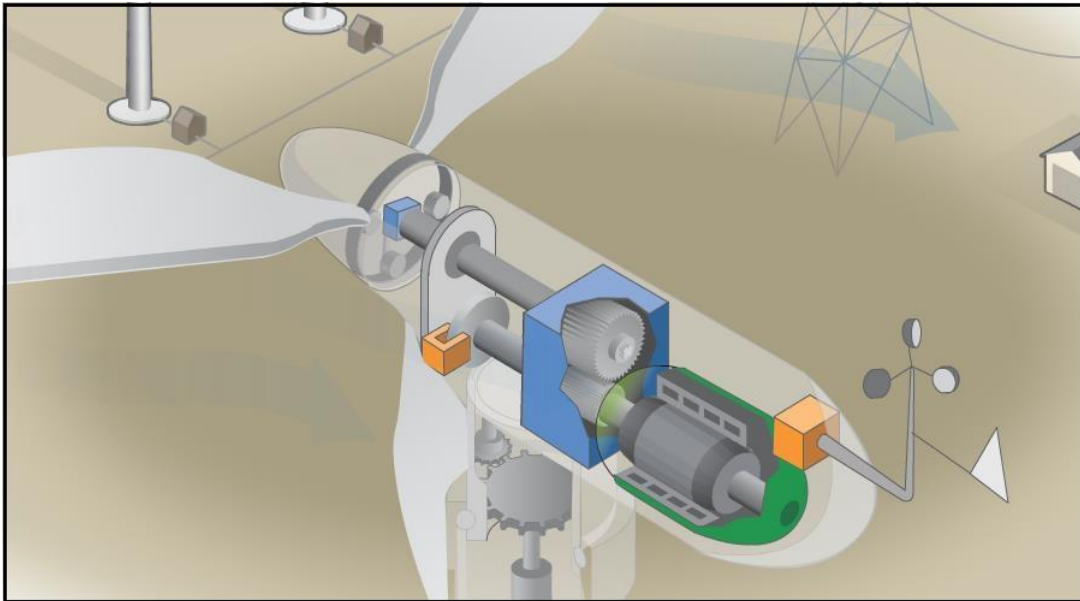


Fonte: Delucchi, Jacobson, 2011

2.4.2 Sistemas de geração eólica

As turbinas eólicas operam a partir de um princípio aerodinâmico análogo às turbinas de um avião, onde o vento passa por duas ou três lâminas de hélice em torno de um rotor. Esse está conectado ao eixo principal, que circula um gerador para produzir eletricidade. A quantidade de energia transferida para o rotor do aerogerador através da força dos ventos, depende da resistência do ar, da área varrida pelo rotor, diâmetro das pás, e da sua velocidade (BURTON et al. 2001).

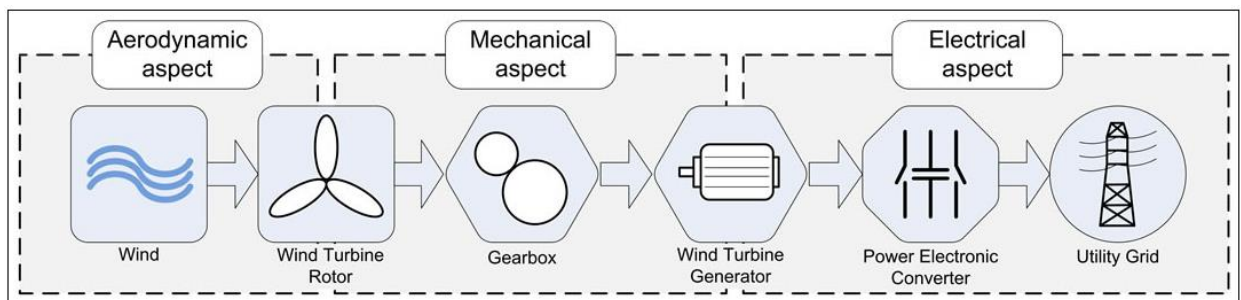
Figura 12 – Funcionamento aero geradores



Fonte: Energy.Gov, 2017

Para criar eletricidade a partir do vento, o eixo da turbina deve ser conectado a um gerador. O gerador usa o movimento de rotação do eixo para voltar um rotor que possui ímãs de carga opostos e está rodeado por alças de fio de cobre. A indução eletromagnética é criada pelo rotor girando em torno do interior do núcleo, fornecendo eletricidade (GoldPower, 2017). No que se refere à distribuição, a eletricidade gerada pelo aproveitamento da energia mecânica do vento deve passar por um transformador para aumentar sua tensão e fazê-lo transferir com sucesso longas distâncias. As estações de energia e as caixas de fusíveis recebem a corrente e transformam-na em uma tensão mais baixa que pode ser usada com segurança pelas empresas e casas (Sakai et al. 2009).

Figura 13 – Sistema de conversão de energia eólica



Fonte – Kim, Lu 2010

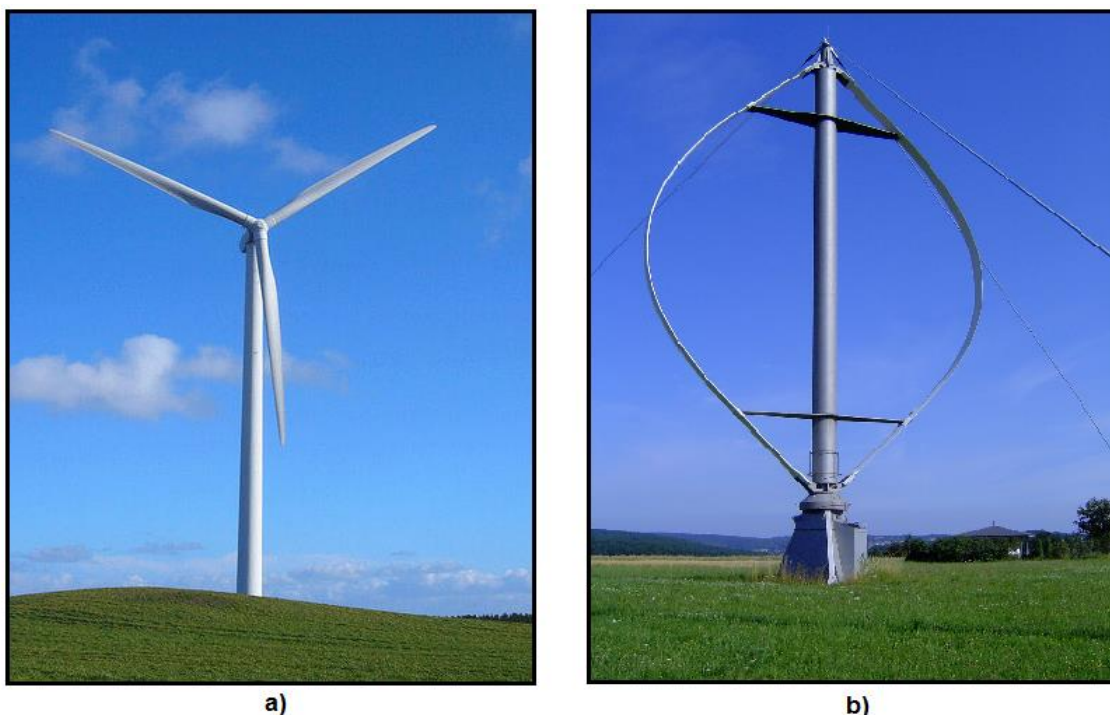
2.4.3 Eficiência de um sistema completo de energia eólica

A geração de energia eólica está associada à energia cinética contida numa determinada massa de vento. É o fluxo de ar que incide sobre as lâminas e através da área do rotor que faz funcionar o aerogerador. De acordo com o princípio de *Betz*, a velocidade de entrada do vento é superior à velocidade de saída, e esta diferença está associada à geração de energia elétrica, sendo em torno de 59,3% a quantidade máxima teórica de energia do vento que pode ser coletada pelo rotor de uma turbina (*Bergey*, 1979). Na prática, a eficiência típica de um rotor é entre 35% a 45%. Considerando o sistema completo de energia eólica, incluindo o rotor, a transmissão, o gerador, o armazenamento e outros dispositivos, a energia fornecida será entre 10% a 30% da original fornecida pela força dos ventos (SJSU, 2013).

2.4.4 Classificações

As turbinas eólicas podem ser classificadas quanto ao eixo de rotação pelo qual o rotor gira. O eixo horizontal significa que o eixo rotativo da turbina eólica é horizontal ou paralelo ao solo, sendo utilizado na maioria das aplicações. Em seguida, a turbina de eixo vertical, o eixo de rotação da turbina fica vertical ou perpendicular ao solo, utilizadas em pequenos projetos e aplicações residenciais (*Fartaj et al.* 2006).

Figura 14 – a) Turbina com eixo horizontal; b) Turbina com eixo vertical



Fonte: Mazharuk, 2016

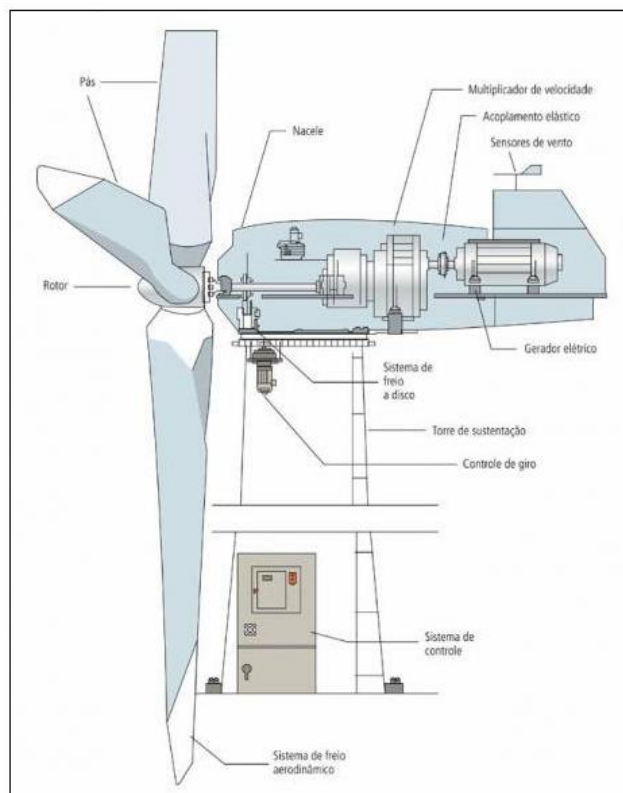
2.4.4.1 Componentes de geradores de eixo horizontal

Abaixo seguem os principais componentes de um gerador convencional, de eixo horizontal, bem como sua descrição:

- a) Pás do Rotor: Capturam a energia eólica e a convertem em energia rotacional no eixo;
- b) Eixo: Transfere a energia de rotação para o gerador;
- c) Nacele: Carcaça onde são abrigados os componentes;
- d) Caixa de Engrenagens: Aumenta a velocidade de rotação do eixo entre o gerador e o cubo do rotor;
- e) Gerador: Usa a energia rotacional para gerar eletricidade utilizando eletromagnetismo;
- f) Unidade de Controle Eletrônico: Monitora todo o sistema, realiza o desligamento da turbina em caso de falha e ajusta o mecanismo de alinhamento da turbina com o vento.
- g) Controlador: Alinha o rotor com a direção do vento;
- h) Freios: Em caso de falha no sistema ou sobrecarga de energia, detém a rotação do eixo;

- i) Torre: Sustenta o rotor e a nacelle, além de erguer todo o conjunto a uma altura onde as pás possam girar com segurança e distantes do solo;
- j) Equipamentos Elétricos: Transmitem a eletricidade do gerador pela torre e controlam os elementos de segurança da turbina.

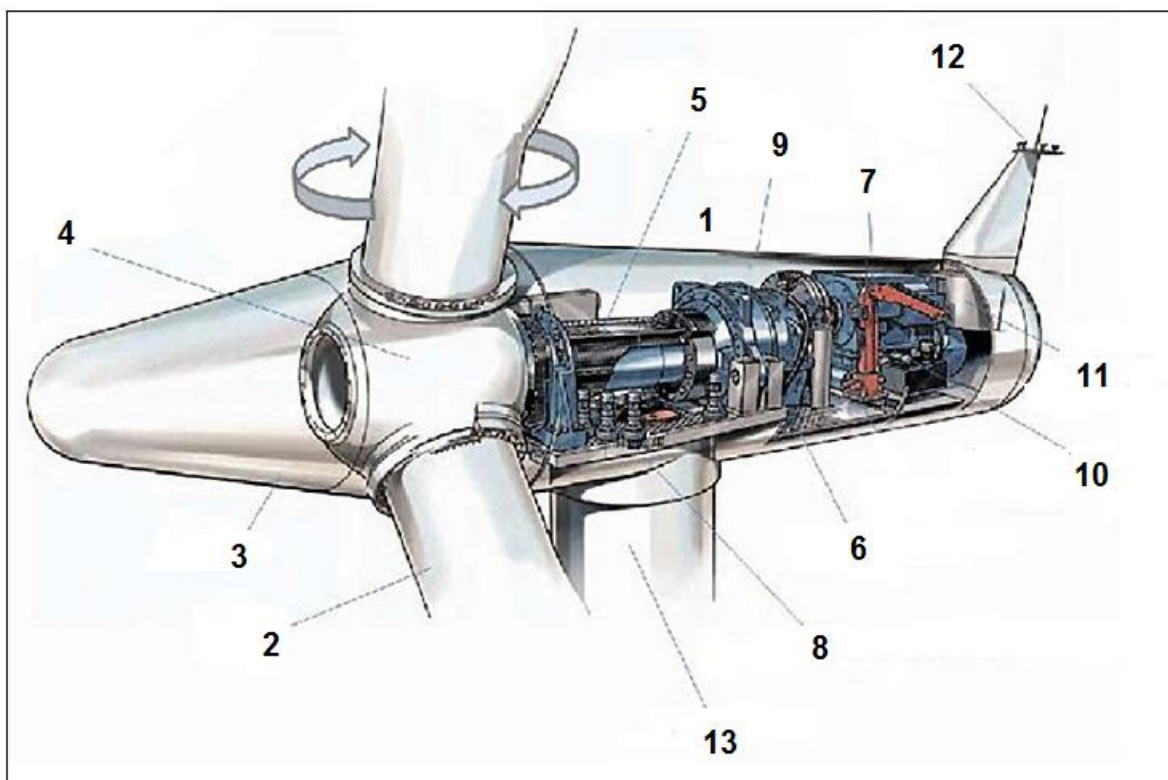
Figura 15 – Componentes gerador de eixo horizontal



Fonte: Evoluçãoenergiaeólica.wordpress.com, 2017

De acordo com Martínez (2016), os principais componentes de uma turbina de eixo horizontal são:

Figura 16 – Principais componentes de um aerogerador



Fonte: Martínez, 2016

- 1) Nacele: trata-se do componente, acima da torre, que abriga outros componentes, como os sistemas de freio, gerador, entre outros. Turbinas de pequeno porte não possuem nacele;
- 2) Pás: aerofólios que capturam a energia do vento e a convertem em energia rotacional no eixo;
- 3) Cubo: conecta as pás e junto com elas formam o rotor, transmitindo a energia captada pelas pás para o eixo;
- 4) Eixo: transfere energia rotacional para uma caixa multiplicadora;
- 5) Caixa de engrenagens (caixa multiplicadora): tem por finalidade aumentar a velocidade do eixo entre o cubo do rotor e gerador;
- 6) Eixo de alta velocidade com freio mecânico: em caso de sobrecarga de energia ou falha no sistema, freia a rotação do eixo;
- 7) Gerador elétrico: utiliza a energia rotacional do eixo com o intuito de gerar eletricidade;
- 8) Controlador de orientação: move o rotor para alinhá-lo com relação a direção do vento;

9) Sistema hidráulico;

10) Unidade de controle eletrônico: desliga a turbina em caso de mau funcionamento, e controla o mecanismo de ajuste;

11) Sistema de resfriamento;

12) Unidade de medição de direção e velocidade do vento;

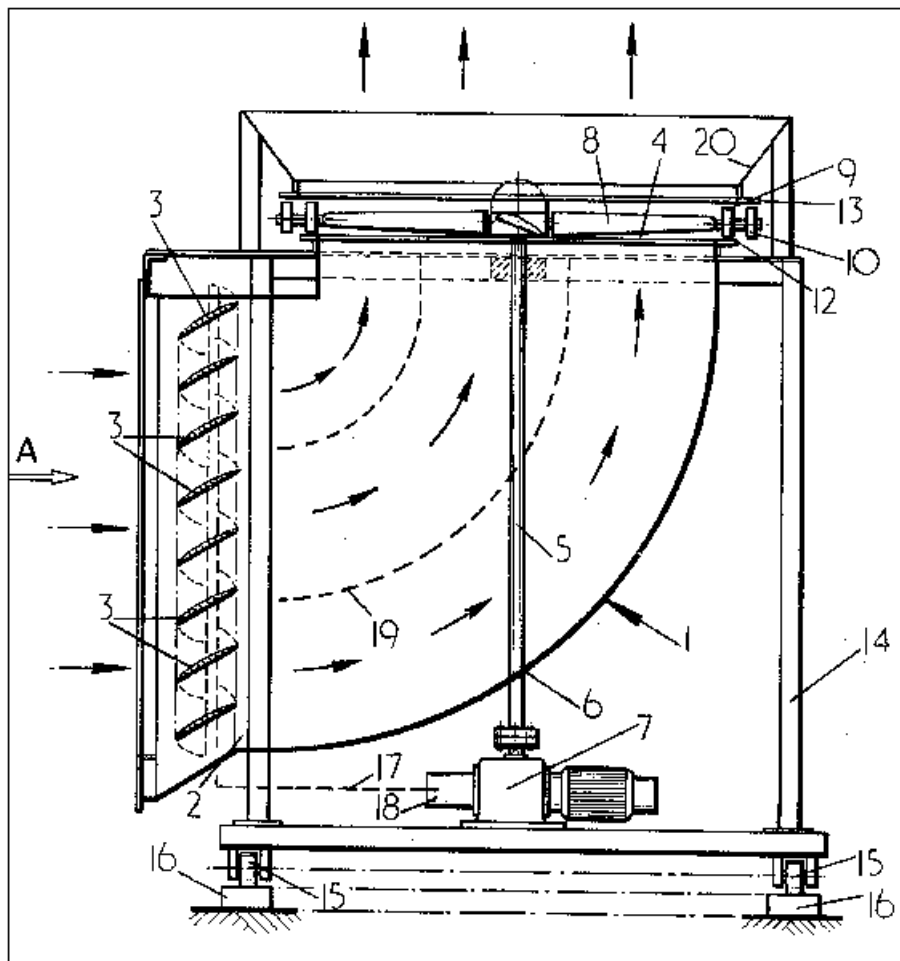
13) Torre: apoia o rotor e a nacela, de maneira a elevar todo o conjunto a uma altura desejada onde as pás possam girar com segurança (KRUGER, 2016).

3 CARACTERIZAÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS CANALIZADAS

3.1 Histórico

A primeira forma de geração de energia eólica através da canalização do vento, similar a tecnologia das TECs, data de 1977, quando foi feita a patente US 4154556 A. O dispositivo proposto tinha por objetivo proporcionar a geração de energia eólica com redução da vibração induzida pelo vento (Webster, 1977). O duto curvo e o eixo da patente original da Webster fazem sentido para turbinas pequenas, em que um gerador montado no cubo tenderia a bloquear o fluxo de ar. Unidades únicas deste tipo foram construídas e testadas em longos períodos e se mostraram efetivas e robustas em operação (NICK et al. 2008).

Figura 17 – Dispositivo para utilizar o poder do vento US 4154556 A



Fonte: Webster, 1977

Durante grande período, não houve evolução expressiva no desenvolvimento das turbinas eólicas canalizadas. No entanto, pequenas turbinas começaram a ser utilizadas em torno de edifícios para produção de energia local, utilizando as pressões diferenciadas geradas ao redor desses edifícios (GRANT, 2003). Nesse sentido, *NICK et al.* (2008) afirmaram que os módulos de turbinas canalizadas podiam ser uma alternativa viável à prática de colocar máquinas convencionais nos telhados dos edifícios existentes. Entretanto, a combinação do alto custo por unidade de potência nominal e a baixa potência dificultou a disputa dessa forma de geração de energia com outras fontes (*NICK et al.* 2008).

Em 2011, *Al-Bahadly e Petersen* formularam o início da geração eficiente de uma turbina eólica horizontal. Utilizando a tecnologia dessa forma, a turbina canalizada tem a capacidade de acelerar o fluxo de ar através de uma ingestão convergente, fazendo com que a velocidade aumente, e a pressão diminua. O incremento energético decorre da relação cúbica com a velocidade do vento, enquanto a relação com a pressão é linear, como evidencia a equação a seguir:

$$Power (W) = \frac{1}{2} * (\rho \text{ air}(\text{kg/m}^3)) * (\text{turbine swept area}(\text{m}^2)) * (\text{wind velocity}(\text{m/sec}))^3$$

$$\text{Potência} = \frac{1}{2} * \rho * \text{TSA} * V^3 \quad (2)$$

Onde:

P é a potência gerada pelo dispositivo (W);

ρ é a massa específica do ar (kg/m^3);

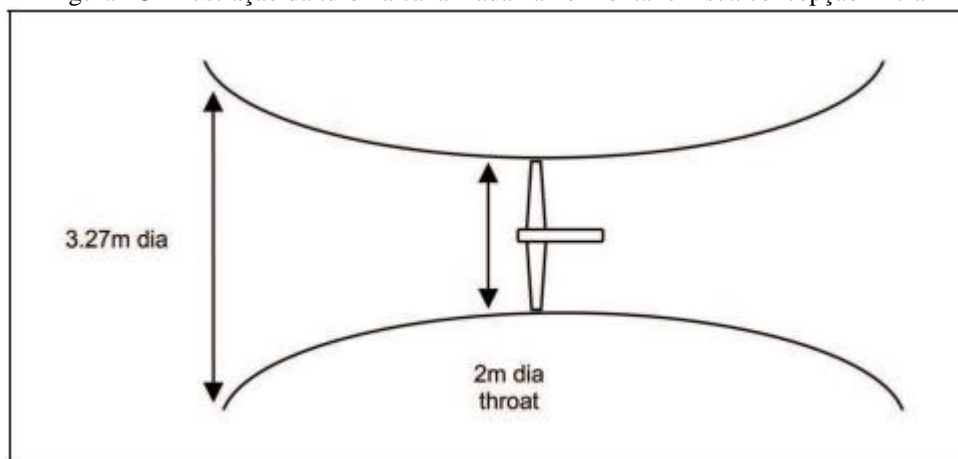
TSA trata-se da área de fluxo de ar captado na entrada do sistema, descontada a sua espessura (m^2);

V é a velocidade do vento (m/seg);

O modelo proposto constituía-se de uma turbina eólica dentro de um duto convergente, resultando em um aumento de eficiência visto que o fluxo de ar é acelerado através do Efeito Venturi. Diante disso, é possível inferir que as TECs horizontais possuem capacidade de geração de energia maior que uma torre eólica geradora (*AL-BAHADLY; PETERSEN, 2011*).

Além disso, a possibilidade de controle do ângulo de ataque do fluxo de ar que entra no duto em direção às lâminas da turbina reduz a geração de ruídos viabilizando assim a instalação de TECs em áreas urbanas densamente povoadas. A figura 18 (dezoito) ilustra a concepção inicial da turbina canalizada na horizontal, base para a projeção do sistema INVELOX.

Figura 18 - Ilustração da turbina canalizada na horizontal em sua concepção inicial



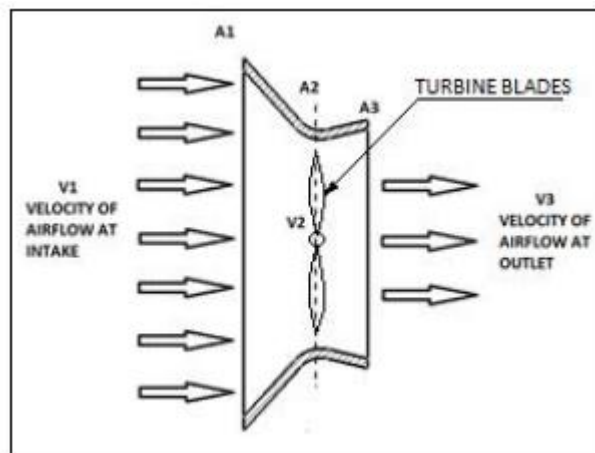
Fonte: Al-Bahadly; Petersen, 2011

3.1.1 Efeito Venturi

O Efeito Venturi ocorre quando um fluido em movimento constante dentro de um duto uniforme comprimi-se momentaneamente ao encontrar uma zona de estreitamento, diminuindo sua pressão e conseqüentemente aumentando sua velocidade após atravessar essa sessão. Esse efeito foi observado em 1797 pelo físico Giovanni Batista Venturi e é explicado pelo Princípio de *Bernoulli* e o princípio de continuidade de massa (TEXON, 1960). Pelo teorema da conservação de energia, em um sistema fechado e sob algumas condições, se a energia cinética aumenta, a energia associada à pressão diminui obrigatoriamente.

A TEC utiliza esse princípio para otimizar a geração de energia. O Efeito Venturi ocorre onde há a estricção e o fluxo de ar adquire maior velocidade. Essa zona de alta velocidade é denominada como área de garganta. Assim, a turbina é montada nesta zona para utilizar a alta energia cinética. Embora ocorra diminuição da pressão, esse decréscimo é linear, enquanto que o aumento da potência é diretamente proporcional à metade do cubo da velocidade do vento (KOTWAIL et al., 2013). Com isso, o dispositivo em questão tem a capacidade de aumentar significativamente a energia extraída pelo fluxo de ar. A figura 19 (dezenove) mostra a lâmina da turbina inserida na área da garganta do Venturi.

Figura 19 – Lâmina de turbina inserida na área da garganta do Venturi



Fonte: Kotwail *et al.*, 2013

Resultados de análises computacionais de TECs de eixo horizontal foram feitas para saber o potencial de saída do vento. Os resultados mostram que a velocidade média na seção Venturi é da ordem de 1,75 vezes, enquanto que a velocidade máxima alcançada foi de 2,5 vezes a velocidade de entrada do ar (KOTWAL *et al.* 2013). Como a potência é proporcional ao cubo da velocidade do vento, um aumento de 60% na velocidade significa que o aumento da potência é da ordem de 4 (quatro) vezes (KRUGER, 2016).

3.2 Estado da arte

A recente tecnologia de turbinas de canalização de vento de eixo horizontal, INVELOX (velocidade aumentada), tem se mostrado promissora devido ao sistema de captura e entrega de vento que permite maior controle, comparado às tecnologias anteriores (ANDREOPOULOS, 2015). Esse novo conceito de energia eólica supera o desempenho das turbinas tradicionais, com um mesmo diâmetro e sob as mesmas condições de vento.

Na geração eólica através de turbinas em torres, a conversão da energia eólica para energia elétrica é controlada pela velocidade livre do fluxo de vento e pela forma, orientação e raio da lâmina. Devido a esses parâmetros de projeto, a altura da torre e o tamanho das lâminas em sistemas convencionais atingiram limites muito desafiadores, impactando em elevados custos de fabricação, logística, instalação e manutenção (PATEL, BHATT, 2016).

Para ter uma capacidade de geração expressiva, os fabricantes têm aumentado muito o tamanho das lâminas nas turbinas tradicionais, chegando a mais de 100 metros de largura, em torres cada vez maiores (ANDREOPOULOS, ALLAEI, 2014). Esse fator eleva consideravelmente o custo e as áreas de terras atingidas, aumentando os problemas oriundos desse sistema e tornando economicamente inviável comparado a outros sistemas de geração de energia.

O custo da energia gerada pelo vento através das turbinas tradicionais continua a exceder o custo da energia gerada por usinas hidroelétricas, carvão e gás natural, por exemplo. As turbinas são muitas vezes sujeitas a tempo de inatividade excessiva, e os custos de manutenção são elevados devido ao tamanho das pás e das torres. Além disso, como visto anteriormente, os problemas à vida selvagem, como por exemplo a migração de pássaros, e a saúde humana devido ondas sonoras de baixa frequência das turbinas eólicas, são grandes entraves para a indústria (GROSS, 2013).

Outras tecnologias inovadoras surgiram como possíveis soluções, mostraram-se eficazes e econômicas para pequenas aplicações eólicas. Contudo, as turbinas condutoras mostraram ser antieconômicas quando escaladas para o tamanho da utilidade devido à dimensão do equipamento e aumento de velocidade requerido (Allaei, Tarnowski, Andreopoulos, 2015). Como resultado, a indústria manteve-se na mesma via e usando turbinas montadas no topo de torres por quase um século.

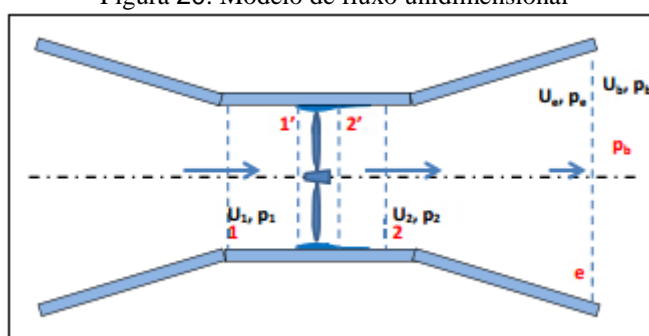
A primeira turbina canalizada surgiu na Finlândia em 1930. Desde então a cada década surgiu um novo sistema. Entretanto, em todos eles a localização da turbina e da entrada estavam fortemente associados. Tendo em vista esses problemas do sistema tradicional e das tecnologias subsequentes, o sistema INVELOX surge como uma promissora forma de geração eólica. Embora o sistema seja considerado como de turbinas condutoras, possui características que o tornam financeiramente viável e apresenta desempenho muito maior comparado às turbinas condutoras e tradicionais turbinas eólicas de eixo horizontal. De acordo com Andreopoulos e Allaei (2014), os principais componentes do sistema são:

- A turbina e a entrada não estão associadas. Com isso, o tamanho da turbina não precisa ser necessariamente do tamanho da entrada. Como o incremento na velocidade através do efeito Venturi pode ser na ordem de 4, geralmente o diâmetro da potência é inferior ao da entrada.

- O desacoplamento acima da entrada e localização da turbina permite que a Turbina Geradora de vento seja montado ao nível do solo, resultando em menor custo de instalação, operação, bem como de manutenção.
- Efeito Venturi permite operar a velocidades na ordem de 6 ou mais e assim, gerar muito mais energia com lâminas menores, utilizando geradores mais eficientes com funcionamento a velocidades mais elevadas.
- As lâminas menores que operam a velocidades de vento muito maiores resultam em economia da ordem de 85% em material, fabricação, transporte e instalação.
- A entrada é projetada para ser unidirecional, e portanto não há necessidade de enormes rolamentos e motores para girar o sistema.
- O INVELOX pode ser projetado com uma potência de 500 W para 25MW. O que importa é quanto ar é capturado.
- O desacoplamento da entrada e da turbina permite que múltiplas entradas sejam conectadas para aumentar o fluxo de massa e, portanto, a saída de potência.

Como principal característica inovadora, pode se destacar a eliminação de turbinas montadas em torre. Outra característica inovadora é que não há necessidade de um controle ativo ou passivo da guinada para orientar a turbina, pelo fato de capturar o fluxo de vento através de uma tomada *Omnidirecional*(*SOLANKI, KAYASTH e BHATT, 2017*), como ilustrado na figura 20 (vinte).

Figura 20: Modelo de fluxo unidimensional



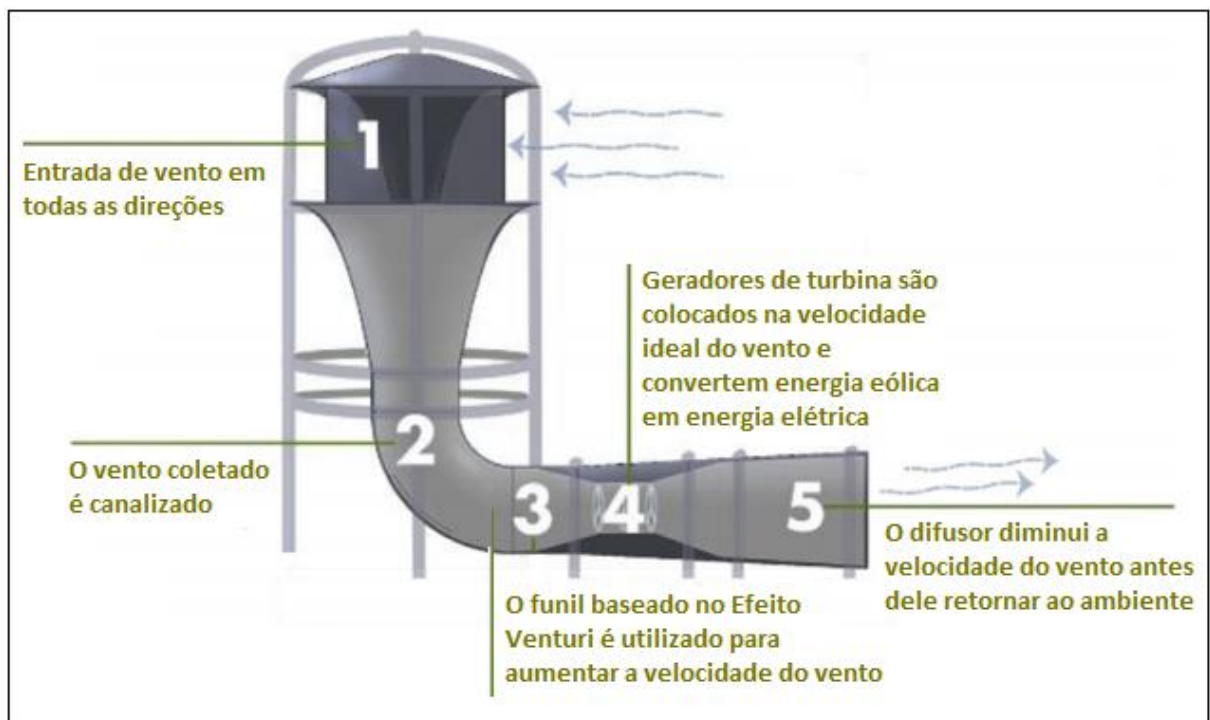
Fonte: *Andreopoulos et al., 2015*

Por fim, acelera a passagem de vento através de uma seção Venturi que é expandida e liberada para o ambiente através de um difusor. Além dessas inovações tecnológicas, o progresso mitiga a maioria dos problemas presentes nas turbinas tradicionais que minaram a

indústria eólica, como a baixa confiabilidade da turbina, impactos adversos ao meio ambiente, de radar e problemas de intermitência (ANDREOPOULOS, ALLAEI, 2014).

As cinco partes principais de INVELOX são mostradas na Fig. 21 (vinte e um) e são elas: 1 – ingestão e captação; 2- transporte da tubulação e do vento acelerado; 3 – funil acelerador da velocidade baseado no efeito Venturi; 4 – aerogerador conversor de energia eólica; 5 – difusor (ALLAEI, ANDREOPOULOS, 2014).

Figura 21 - Esquema do sistema com seus principais componentes



Fonte: Adaptado de Allaei; Andreopoulos e Tarnowski, 2015

Pelo fato do tamanho do sistema ser muito inferior ao sistema tradicional e não haver componente móvel no topo da torre, a maioria dos impactos ambientais são eliminados ou minimizados. Além disso, a ausência de uma grande turbina rotativa no topo da torre possibilita que a instalação entre sistemas seja consideravelmente menor, reduzindo os requisitos de terra requeridos. Problemas como interferências em radares e emissão de ondas de baixa frequência também não ocorrem.

Além disso, o INVELOX não exige o enorme custo inicial de capital da tecnologia tradicional eólica, bem como não deixa um impacto ambiental negativo (ALLAEI; ANDREOPOULOS, 2015). Em resumo, esse sistema inovador tem o potencial de reduzir o custo líquido da geração de energia eólica em escala de utilidade, melhorando a produção de

energia e mitigando a maioria ou a totalidade dos problemas ambientais; permitindo assim, que o parque eólico possa competir em igualdade de condições com usinas de gás natural e energia hidrelétrica (HRUGER, 2016).

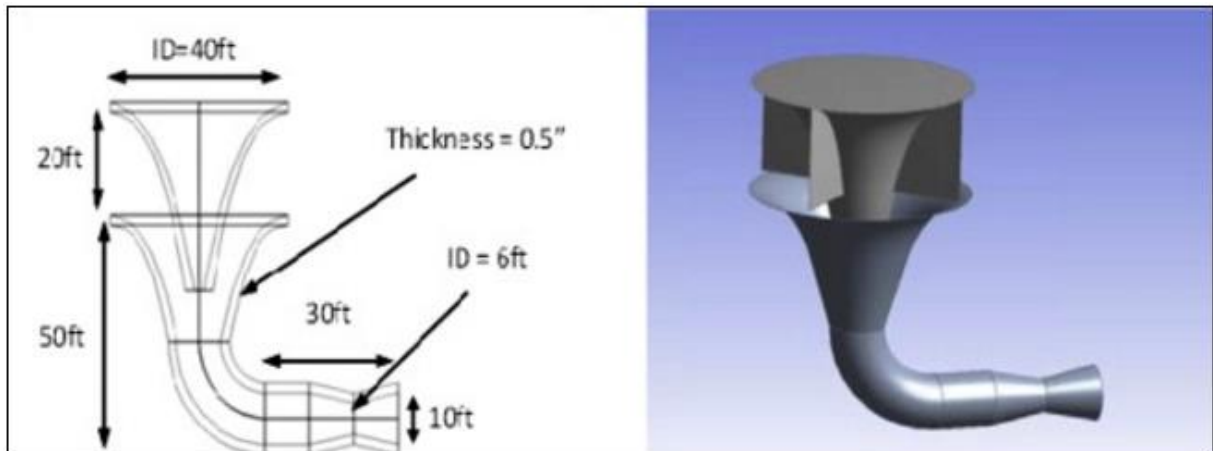
Segundo os criadores do sistema INVELOX, essa tecnologia tem um custo muito mais baixo que o sistema tradicional. O novo sistema custa em torno de 750 dólares para produção de 1 *kilowatt* enquanto o tradicional varia de 3 mil dólares a 5 mil por *kilowatt* de capacidade.

3.3 Simulação

Simular o desempenho desse sistema é substancialmente desafiador devido à complexidade do método de entrega de vento, à interação na parte frontal com uma turbina na parte de trás. Neste trabalho, são computados os resultados computacionais, medidos a partir de uma unidade de campo. Os objetivos dessa modelagem compreendem o fluxo de vento dentro do INVELOX onde fica a turbina, combinando o fluxo externo e o fluxo de exaustão do sistema. A partir da análise dos resultados, é possível inferir que é possível capturar, acelerar e concentrar o vento dentro do sistema e com o aumento da velocidade do vento resulta numa melhoria significativa na potência de saída do vento (*Allaei; Andrepoulos, 2013*).

As primeiras simulações do sistema foram feitas em CFD (*Computational Fluid Dynamics*). A Fluodinâmica Computacional é descrita como a simulação numérica dos processos físicos ou físico-químicos que apresentam escoamento, transferência de calor, entre outros. Os modelos CFD aplicados às TECs utilizaram as dimensões e *design* conforme apresentado na figura 22 (vinte e dois).

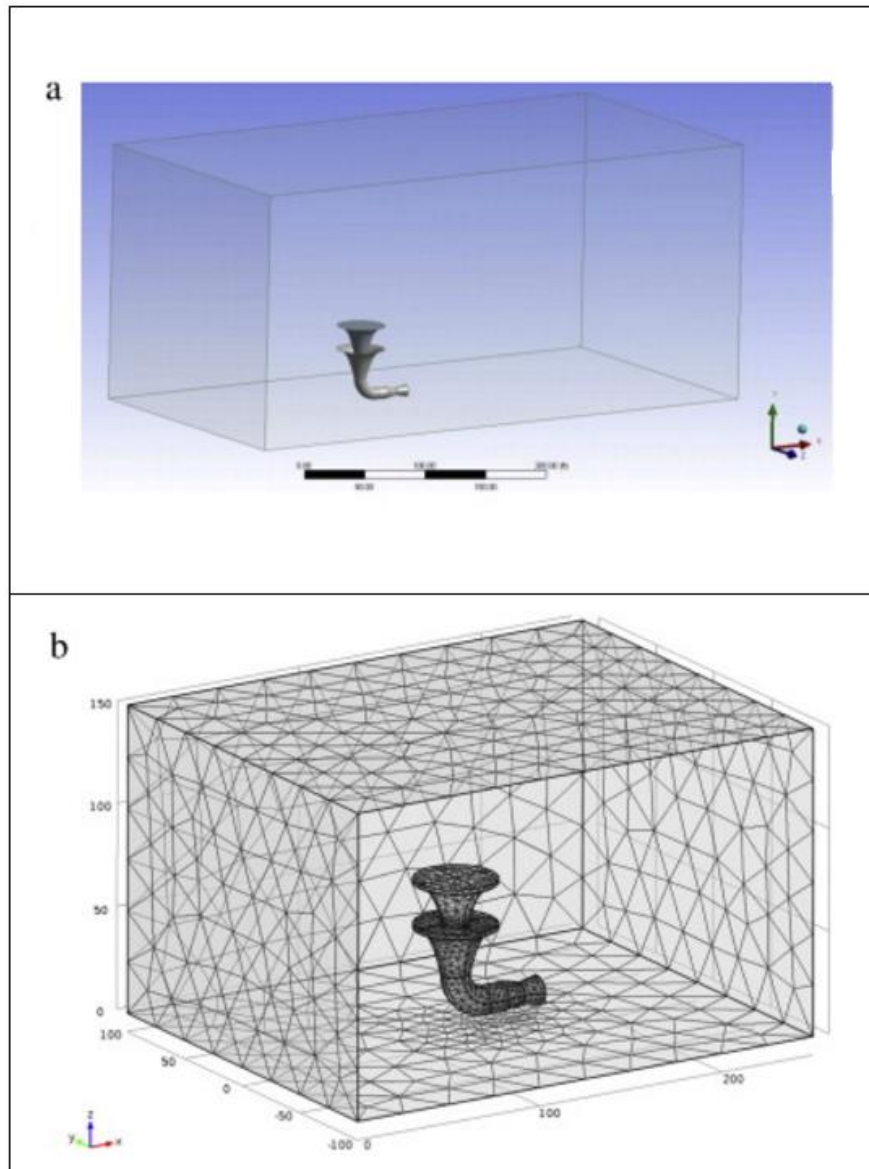
Figura 22 – Dimensões detalhadas e geometria do INVELOX



Fonte: Andreopoulos, Allaei, 2014

Este modelo utiliza o conceito de cone alinhado duplo, com o diferencial de entrada de vento em todas as direções. O sistema foi dimensionado para se ajustar a uma turbina eólica de 1,8 m de diâmetro na garganta e com altura total de 18 m. Um parâmetro importante para ser considerado no momento de projeto, é a relação entre a velocidade do vento na garganta U_i em relação à da corrente livre externa U_e , $S_r = U_i / U_e$. No sistema em questão, o fator de projeto foi elaborado para ser em torno de 2 (dois). Com isso, se a velocidade do vento livre é de 6 m/s, a velocidade no local da turbina será igual a 12 m/s. Com relação aos cones superiores é o guia que dirige o vento para o cone inferior. A ingestão também foi equipada com quatro aletas orientadas a um ângulo de 45° para a direção do fluxo, contribuindo para aumentar ainda mais o desempenho da entrada na captura de fluxo livre (ALLAEI, ANDREOPOULOS, 2014).

Os dois modelos foram ajustados de maneira independente com o objetivo de comparar os resultados. Os domínios computacionais usados nos cálculos foram os pacotes comerciais ANSYS, com dimensões de 120 m de comprimento, 72 m de largura e 67,2 m de altura; e o COMSOL, com dimensões de 60 m x 90 m x 45 m. O diâmetro externo do funil superior na altura em que termina o funil inferior era de 2 m, enquanto que o diâmetro interno da parte inferior na mesma altura era em torno de 6 m. A figura 25 (vinte e cinco) mostra o domínio de fluxo utilizado nos dois modelos.

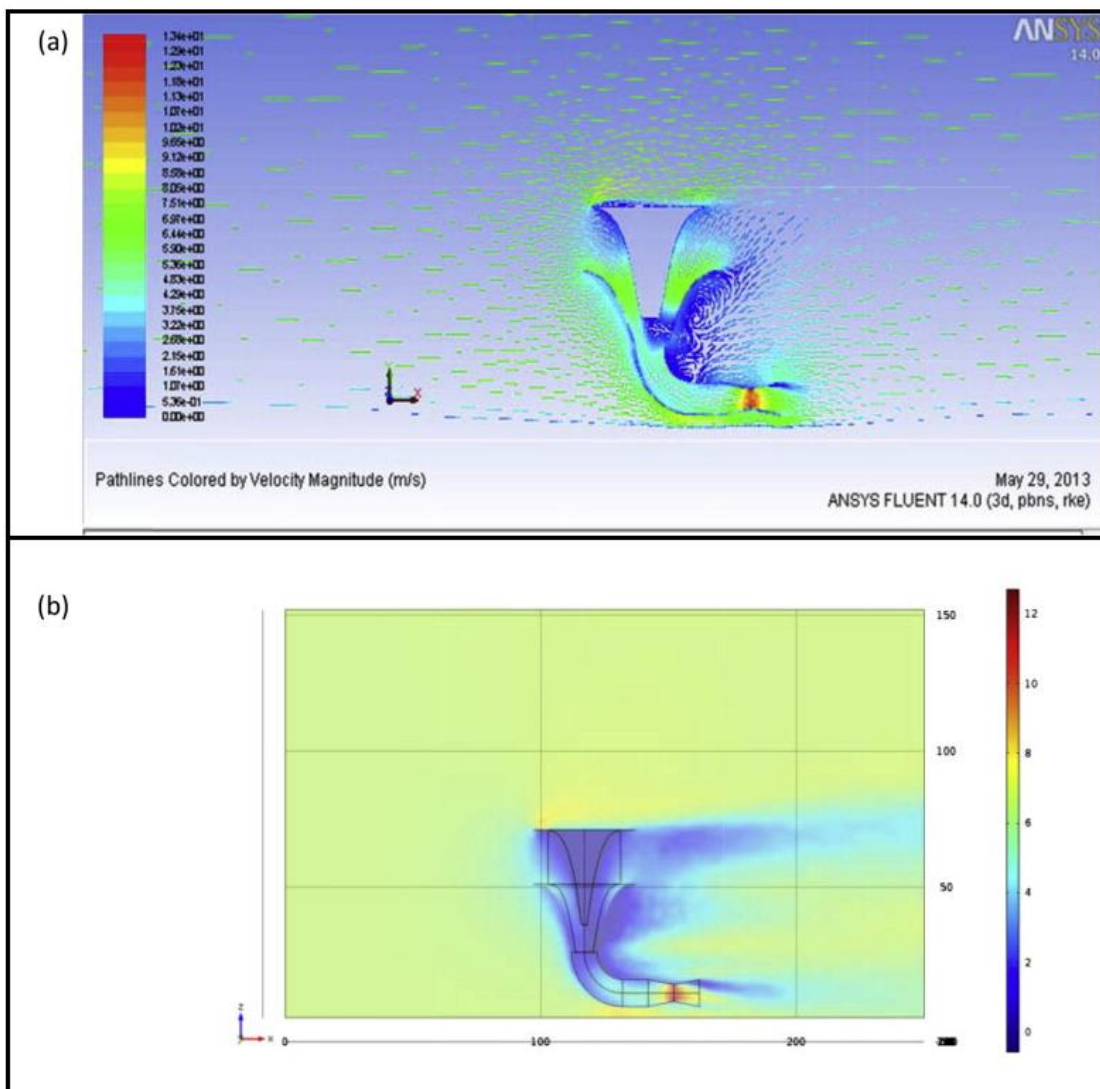
Figura 23 – Domínios computacionais utilizados em a) *ANSYS* e b) *COMSOL*.

Fonte: *Andreopoulos, Allaei, 2014*

De acordo com *Allaei, Andreopoulos (2014)*, as simulações demonstram que o vento capturado pelo sistema de ingestão apresenta velocidade constante, representando o fluxo livre de vento externo. Estes dados simulados foram integrados ao longo da seção transversal do funil em um ponto a montante e outro a jusante para a verificação da saída do fluxo, de maneira a fornecer as velocidades médias, além das taxas de fluxo de ar do sistema. A magnitude da velocidade de captação do vento foi ajustada para 6,7 m/s e de acordo com as simulações, a velocidade dentro do confinamento do funil foi de 12 a 13 m/s. A pressão de referência foi assumida como a pressão atmosférica em todo o domínio.

Ao colidir com a estrutura superior, o fluxo de ar capturado é desviado pela entrada para baixo e após uma rotação de 90°, atinge a sessão do Efeito Venturi onde é acelerada como mostrado na figura 25 (vinte e cinco). As distribuições de velocidade parecem similares nas duas plataformas, *ANSYS* e *COMSOL*, e indicam que a velocidade máxima ocorre no *Venturi*. (ALLAEI, ANDREOPOULOS, 2014).

Figura 24 – Perfil de velocidade, corte no eixo de simetria: a) Modelo *ANSYS*; B) modelo *COMSOL*.

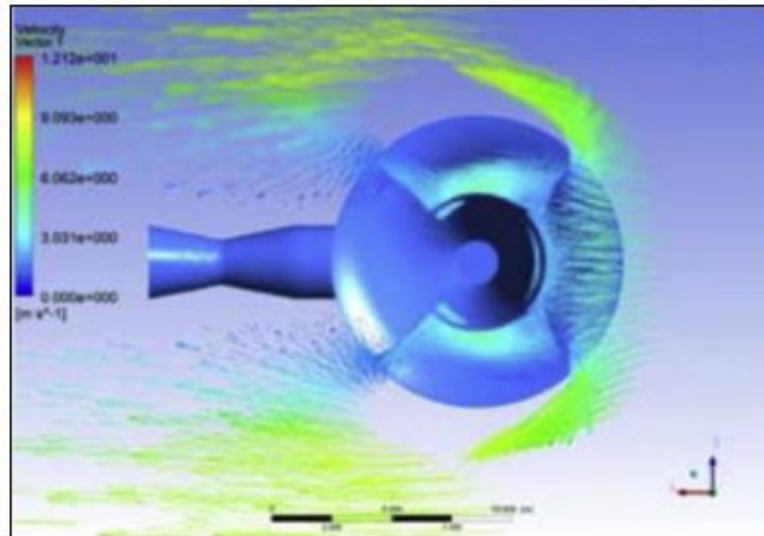


Fonte: ALLAEI, ANDREOPOULOS, 2014

Como demonstrado nas simulações, ingestão do fluxo livre de ar é bastante complexa. Parte do fluxo entrante introduz na parede do quadrante frontal da entrada formada pelos quatro defletores de divisão e é desviada para baixo dentro do sistema de entrega. Outra parte do fluxo livre é desviada para os lados da entrada e separa-se na ponta das duas

barbatanas, como demonstrado na figura 27 (vinte e sete) . O fluxo dentro dos funis parece não ser uniforme e existe uma zona de separação na sessão. Em geral, a ingestão capta uma quantidade significativa de massa de ar livre, que também está associada a uma pequena porção do fluxo que sai do sistema (ALLAEI, ANDREOPOULOS, 2014).

Figura 25 – Vista superior dos vetores de velocidade



Fonte: ALLAEI, ANDREOPOULOS, 2014

3.3.1 Comparativo TEC e Torre Eólica Padrão

ALLAEI, ANDREOPOULOS (2014) realizaram demonstrações em campo do sistema de entrega INVELOX, que foi construído em um parque industrial em 2013 na cidade de Chaska, em Minnessota, com o objetivo de comparar os resultados com o sistema de torre convencional. Foram instalados medidores para mensurar a velocidade livre do vento na entrada, na curva do tubo e no plano de saída da garganta. Com essa configuração, foi possível o fornecimento dos dados da velocidade do vento antes e depois da turbina. Os resultados apresentados no estudo são de uma turbina de três lâminas com potência de 600 W a uma velocidade de 12,5 m/s.

Figura 26 – Sistema de turbina convencional e sistema TEC em Chaska, Minnessota



Fonte: ALLAEI, ANDREOPOULOS, 2014

Tabela 5 – Especificação dos dispositivos inseridos no experimento TEC

Item		Torre tradicional	INVELOX
Modelo		Sunforce 600	Sunforce 600
Diâmetro do rotor (m)		1.31	1.31
Velocidade potência nominal do gerador (m/s)		12.5	6.25
Poder nominal (W)		600	600
Tensão (V)		24	24
Corrente nominal de carga máxima		35	35
Gerador		Trifásico	Trifásico
Velocidade livre do vento do fluxo (m/s)	De corte	2.0	1.0
	Máxima	70.0	35.0
Número de lâminas		3	3
Material das lâminas		Fibra de vidro	Fibra de vidro
Resistência do banco de carga (ohms)		10	10
Altura da torre (m)		10	18.3
Frenagem sobre-velocidade (rpm)		1.400	1.400

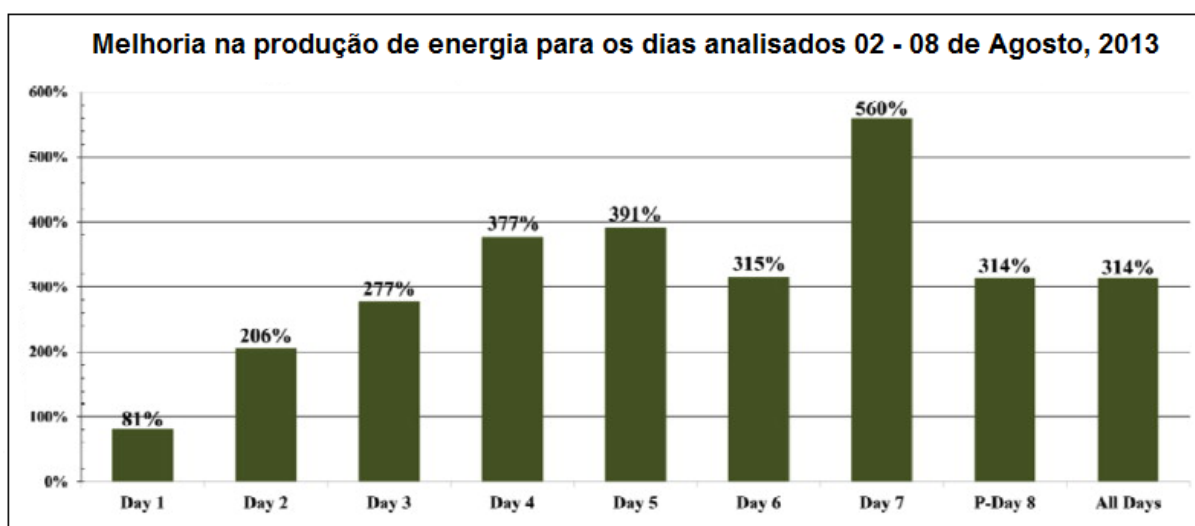
Fonte: ALLAEI, ANDREOPOULOS, 2014

A tabela 5 mostra as especificações dos dois sistemas. Os componentes como a turbina, o gerador, o painel de controle, o banco de carga e todos os sensores, são iguais para a turbina na torre convencional e para a TEC.

A simulação foi realizada utilizando a mesma turbina para os dois sistemas. Na torre eólica convencional, a turbina foi colocada em cima do sistema, enquanto que na TEC o gerador foi instalado dentro da sessão Venturi. O mesmo sistema de conversão elétrica e o mesmo banco de carga foram utilizados. Assim, foi possível comparar diretamente o desempenho dos dois sistemas (ALLAEI, ANDREOPOULOS, 2014).

O local onde foi realizado o experimento é considerado como de classe 1(um) ou 2 (dois), com velocidades de vento entre 0 e 4,5 m/s. No entanto, foi adotado como sendo de classe 3 (três) (entre 4,5 e 6,0 m/s). Mesmo com os diversos obstáculos ao redor do local do experimento, foram observados aumentos de produção de energia em comparação ao sistema de torres eólicas geradoras, entre 80 a 560% a mais de energia gerada no período de teste comparativo de 8 (oito) dias, como demonstra a figura 28 (vinte e oito) (ALLAEI, ANDREOPOULOS, 2014).

Figura 27 – Melhoria na produção de energia



Fonte: ALLAEI, ANDREOPOULOS, 2014

4 O MODELO DAS TECS

A energia eólica vem crescendo e aumentando cada vez mais sua importância na constituição da matriz energética brasileira e mundial. O Ministério de Minas e Energia prevê que no Brasil a geração de energia a partir da força nos ventos será da ordem de 32 GW em 2024, com crescimento anual de cerca de 2 GW (ANEEL, 2015). Além disso, estudiosos indicam que o potencial de geração nacional é da ordem de 350 GW e cerca de 70.000 GW em nível mundial. Ainda assim, o elevado custo associado à atual tecnologia aplicada à essa fonte de energia e os problemas oriundos da utilização das turbinas eólicas convencionais são grandes entraves para o desenvolvimento da indústria (GROSS, 2013). Com isso, a aplicação das TECS apresenta-se viável devido aos seus diversos benefícios associados.

4.1 Incremento da velocidade e energia gerada

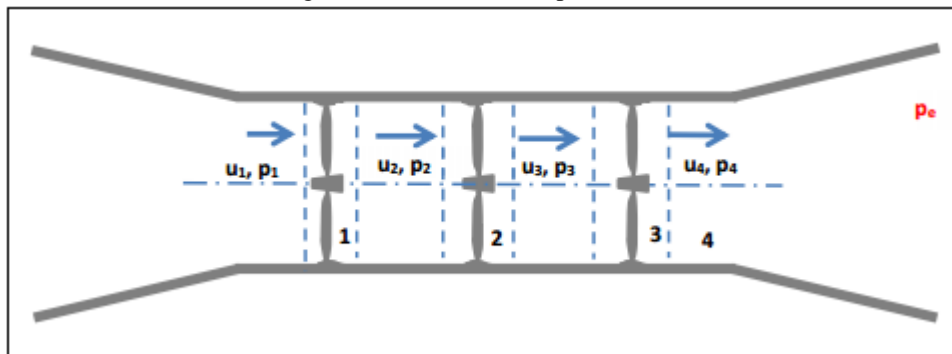
O novo sistema baseia-se essencialmente na captação, concentração e a aceleração do vento, produzindo energia limpa em qualquer espaço. Em vez de capturar partes do vento que passa pelas pás de um rotor, a nova tecnologia capta o fluxo do vento através da entrada omnidirecional, envia o fluxo dentro da secção Venturi que acelera passiva e naturalmente. (PATEL, BHATT, 2016).

Essa característica do sistema é fundamental, uma vez que permite uma velocidade mínima de operação muito menor, em decorrência do aumento da velocidade. O sistema captura uma grande porção de fluxo de ar livre e pode fazê-lo em quase todas as localizações de fluxo livre maiores que 1 m/s, sendo portanto, um sistema com alcance geográfico elevadíssimo. Segundo *Allaei, Tarnowski, Andreopoulos* (2015), caso o aumento da velocidade do vento seja por um fator 4, e utilizar uma turbina tradicional com velocidade de corte de 4 m/s, a velocidade de corte do INVELOX-turbina será de apenas 1m/s.

Isso permite aproveitar a energia eólica em vários estágios, uma vez que quando há mais de uma turbina na sessão, as subsequentes aproveitam a energia eólica que a primeira turbina não pode aproveitar devido às suas limitações de conversão de potência (Allaei, Tarnowski, Andreopoulos, 2015). De acordo com Solanki, Kayasth e Bhatt (2016), um sistema de turbinas múltiplas funciona consideravelmente melhor para duas ou três turbinas em 52% e 72%, respectivamente, demonstrando que o incremento de energia total, embora expressivo, não é linear com o aumento no número de turbinas.

As figuras 21 (vinte e um) e 22 (vinte e dois) mostram três geradores de turbinas eólicas instalados na sessão Venturi de um sistema TEC.

Figura 28 - Caso de múltiplas turbinas



Fonte: Andreopoulos et al., 2015

Figura 29 - Três geradores de turbinas eólicas instaladas no Venturi



Fonte: Andreopoulos et al., 2015

O fluxo de energia eólica aciona então um gerador instalado de forma segura e economicamente em níveis de solo ou subsolo. Com a direção descendente do fluxo de ar para o nível do solo, é possível produzir mais energias com pás de turbina cerca de 82% menores que as tradicionais. Resultados obtidos a partir de simulações mostraram que um aumento na saída de energia ocorre quando várias turbinas são instaladas dentro de INVELOX e assim a produção de energia diária é significativamente melhorada (ALLAEI, TARNOWSKI, ANDREOPOULOS, 2015). Além disso, o isolamento dos sistemas de ingestão e do funil no qual a turbina está instalada. Permite projetar a TEC além da operação com ventos de velocidades reduzidas, o funcionamento com ventos elevados e a geração de mais energia.

4.2 Instalação ao nível do solo e redução dos custos

No sistema INVELOX, a entrada do vento está no topo enquanto o gerador da turbina é colocado no nível do solo dentro do tubo condutor que transporta vento capturado em direção à turbina. Isso possibilita que os engenheiros dimensionem o sistema de entrada de vento para qualquer aumento de velocidade necessário sem aumentar o tamanho da turbina. A instalação da turbina-gerador no nível do solo gera significativa economia no momento da instalação do sistema, na operação e manutenção ao longo da vida útil (AllaeiALLAEI, TARNOWSKI, ANDREOPOLUS, 2015).

4.3 Mitigação de impactos ambientais negativos

Como visto, os principais impactos ambientais relacionados à instalação de torres eólicas geradoras em grandes empreendimentos estão associados ao impacto na vida selvagem, ao impacto visual, à geração de ruído, ao efeito de cintilação (*Shimmer Flicker*), à interferência eletromagnética, ao requisito de terra e as mudanças climáticas (FADIGAS, 2011; DUTRA, 2011).

A partir do uso das TECs, esses problemas são eliminados ou minimizados, uma vez que sua implementação não requer o uso da turbina em grandes alturas e a utilização de enormes pás (ALLAEI, ANDREOPOULOS, TARNOWSKI, 2015). Com isso, não haverá interferência eletromagnética devido ao bloqueio das ondas magnéticas em decorrência gigantescas lâminas instaladas em elevadas alturas.

Outro benefício é a não intervenção na migração de pássaros e morcegos, um dos principais problemas associados à geração eólica através das torres convencionais. Com relação ao impacto visual, as TECs podem ter seu design adaptado ao local onde será instalada. Podendo assim, ser um componente arquitetônico agradável ao meio, como mostra a figura 30 (trinta).

Figura 30 – Diferentes designs para utilização das TECs



Fonte: *Sheerwind*

Os impactos associados à redução de ruído são reduzidos consideravelmente. Ao controlar o ângulo de ataque do fluxo de ar que entra no sistema, reduzirá consideravelmente o ruído. Com isso, permitirá o posicionamento desses geradores eólicos mais próximos as áreas povoadas (AL –BAHADLY, PETERSON, 2011). O efeito cintilação (*Shimmer Flicker*), está associado ao sombreamento que uma turbina gera quando a luz solar incide sobre elas. Como as lâminas nas TECs estão dentro do sistema e no nível do solo, esse problema é totalmente solucionado.

Além disso, a ausência de uma grande turbina rotativa no topo da torre como é no sistema convencional, possibilita que a instalação entre sistemas seja consideravelmente menor, reduzindo os requisitos de terra requeridos, bem como os problemas associados as mudanças climáticas, uma vez que a geração de energia tem eficiência superior a 4 vezes, gerando bem mais energia com a mesma quantidade de vento, comparado ao sistema convencional.

4.4 Geração distribuída

O incremento da velocidade e energia gerada ocasionado pelo efeito Venturi permite a instalação do INVELOX em áreas de vento de classe 1 e 2 e possibilita a instalação mais próxima do consumidor final, reduzindo consideravelmente os custos adicionais e as perdas de transmissão. Com isso, a tecnologia abordada tem o potencial de fornecer energia de micro e macro escala para qualquer finalidade (*ALLAEI; ANDREOPOULOS, 2013*).

Essa característica permite que a implantação do sistema em maiores áreas, além de ter um tempo ocioso de trabalho menor que o sistema de geração de energia eólica tradicional. De acordo com *Allaei, Tarnowski, Andreopoulos (2015)* as turbinas eólicas atuais são sujeitas a tempo de inatividade da ordem de semanas devido ao longo tempo de manutenção nas lâminas ou no gerador que fica no topo das torres, tornando uma usina de energia eólica tradicional muito cara de operar.

Os dispositivos TECs podem ser utilizados de forma local, para alimentar um ou mais consumidores. O sistema de compensação de energia elétrica, conforme Resolução nº 482/2012 da Aneel, permite que o dispositivo seja interligado a rede principal de energia, permitindo que o usuário adquira créditos que serão compensados a favor da unidade consumidora que gerou a energia (*FRANÇOIS; ALÉ, 2013*).

5 APLICAÇÃO DAS TECS

O modelo de negócio da *SheerWind*, empresa que patenteou o sistema INVELOX, é baseado no pleno licenciamento que inclui a produção local, montagem, instalação e reparação para os clientes locais. Os licenciados são denominados como *Hubs SheerWind* autorizados. A empresa não emite licença para venda, somente para tecnologia completa, sendo concedido ao licenciado o direito de fabricar, instalar e operar os sistemas no seu segmento de mercado (*SheerWind*, 2017).

O custo total de processamento para receber uma licença hub é de US \$ 75 mil. Atualmente o sistema possui licenças na Nova Zelândia, Holanda, China, Irã e EUA, e em fase final de negociações com empresas na Dinamarca, Alemanha, Espanha e Portugal. A tabela 6 (seis) mostra como está a situação das licenças da empresa em todo o mundo.

Tabela 6 – Situação licenças tecnologia INVELOX em todo o mundo

Status dos hubs licenciados em setembro de 2016						
	Número licença	Ano	Localizaçã o companhia	Mercados licenciados	Território licenciado	Status atual
Em operação e ativo	1	2011	EUA	Todos	EUA	5kW, 3 200 KW, e um 1.8MW sendo instalado em 2015-17
	2	2014	Nova Zelândia	Todos	Nova Zelândia	1ª unidade construída e testada, 100KW colocado em produção
	3	2015	Nova Zel.	Todos	Irã	2MW instalados, 100MW previstos
	4	2015	China	Todos	China	200KW e 1MW encomendados 2016
	5	2015	Holanda	Todos	Holanda	200KW e 2MW instalados em 2016
	6	2015	EUA	< 2MW	EUA	Primeiro sistema será instalado 2017
Em breve para se tornar ativo	1	2016	EUA	< 2MW	EUA	Licença ativa em 2017, primeira unidade final de 2017
	2	2016	Hawaii	< 2MW	Hawaii	Primeira unidade final de 2017
	3	2016	Filipinas	Todos	Filipinas	Primeira unidade final de 2017
	4	2016	Inglaterra	Todos	Inglaterra	Primeira unidade final de 2017
	5	2016	Canada	Todos	Canada	Primeira unidade final de 2017
	6	2016	Índia	Todos	Índia	Primeira unidade final de 2017
	7	2016	Alemanha	Todos	Alemanha	Primeira unidade final de 2017
Os pedidos recebidos e revisão	1	2016	Dinamarca	TBD	Quênia	Aplicação sob revisão
	2	2016	Austrália	TBD	Austrália	Várias perspectivas sendo analisadas
	3	2016	África do Sul	TBD	África Sul	Várias perspectivas sendo analisadas
	4	2016	Alemanha	TBD	Alemanha	Várias perspectivas sendo analisadas
	5	2016	Inglaterra	TBD	Inglaterra	Várias perspectivas sendo analisadas
	6	2016	Itália	TBD	Itália	Várias perspectivas sendo analisadas
	7	2016	Turquia	TBD	Turquia	Várias perspectivas sendo analisadas
	8	2016	Espanha	TBD	Espanha	Várias perspectivas sendo analisadas
	9	2016	Canadá	TBD	Canadá	Várias perspectivas sendo analisadas
	10	2016	Brasil	TBD	Brasil	Várias perspectivas sendo analisadas
	11	2016	Rússia	TBD	Rússia	Várias perspectivas sendo analisadas

Fonte: SheerWind, 2017

5.1 EUA, Virginia

Sistema INVELOX instalado em 2014 no Estado da Virginia, com o intuito de geração de energia eólica para as Forças Armadas e os laboratórios *Wyle*.

Figura 31 – Sistema INVELOX instalado no Estado da Virginia



Fonte: *SheerWind*, 2017

Especificações da unidade:

- Altura do cubo = 6,1 m
- Altura total = 7,8 m
- Comprimento total = 7 m
- Ingestão $d = 4$ m
- Concentrador $d = 1,3$ m
- Venturi $d = 0,50$ m
- Difusor $d = 1,8$ m

5.2 Nova Zelândia

A empresa de engenharia Neozelandesa Pacific Wind instalou em 2016, seu primeiro disposto INVELOX no país, produzindo até 300% de energia elétrica a mais que os sistemas tradicionais.

Figura 32 – 100KW de geração de energia na Nova Zelândia através do sistema INVELOX



Fonte: *Scoop*, 2017

5.3 Irã

No Irã, 2MW estão sendo instalados, 100MW estão em processo de desenvolvimento neste ano e a previsão é de que sejam explorados um total de 3GW num futuro próximo. Segundo colaboradores da empresa *Watt-Wind*, responsável por introduzir esse sistema de geração de energia eólica que representa um marco na geração de energia renovável no país, o retorno do investimento na usina de energia eólica INVELOX leva em torno de um ano (*Financial Tribute*, 2017).

5.4 China

A empresa licenciada *ShearWindChina* instalou em 2016 o maior dispositivo dessa tecnologia até o momento. A instalação do sistema fornecerá benefícios econômicos e ambientais locais substanciais e de longo prazo (*ShearWindChina, 2016*). O sistema tem altura de 45 metros, possui 3 turbinas instaladas na sessão Venturi com lâminas de rotor de 5 metros e a produção de energia anual esperada é de cerca de 2.2 MW (*PR Newswire, 2017*).

Figura 33 – Sistema de geração para 2.2MW na China



Fonte: *SheerWind, 2017*

5.5 Holanda

A empresa Nedpower SheerWind, tem a pretensão de que em 2020, 14% da geração de energia total na Holanda seja gerado através do INVELOX. Em 2018, a empresa pretende a instalação do sistema em 10 a 25 telhados, sendo possível a instalação de 2,2MW. No ano de 2017, foi construído em um telhado na cidade de *Spijkenisse*, na Holanda. A produção de energia eólica desse sistema em específico é da ordem de 200KW (*NedPowerSWH, 2017*).

Figura 34 – 200KW instalado na Holanda

Fonte: *SheerWind*, 2017Figura 35 – 200KW instalado em um telhado na cidade de *Spijkensisse*, HolandaFonte: *SheerWind*, 2017

5.6 EUA, Dakota do Sul

5.6.1 Sistema 1

Em 2015, a Guarda Nacional do Exército, em Michigan, investiu US \$ 1,5 milhão em dois dispositivos com o intuito de gerar eletricidade através do vento. Com a instalação da tecnologia INVELOX, com geração de 200 KW com possibilidade para aumentar para 500kw, a Guarda Nacional pretende aumentar a porcentagem de energia renovável que utilizam para 25% até 2020. A velocidade do vento alcançou valores de 75 m/s no Venturi, gerando significativa energia através das três turbinas alinhadas. De acordo com simulações, o sistema INVELOX obteve aumento de velocidade do vento na ordem de 7 a 12 vezes na garganta, comparado ao sistema a velocidade do fluxo livre de ar (*SheerWind*, 2016).

Figura 36 – Sistema 1 SheerWind INVELOX instalado na Guarda Nacional do Exército em Michigan



Fonte: *SheerWind*, 2016

Especificações da unidade:

- Altura do cubo = 22 m
- Altura total = 30 m
- Comprimento total = 70 m
- Ingestão d = 8,2 m
- Concentrador d = 8 m
- Venturi d = 3 m
- Difusor d = 11 m

5.6.2 Sistema 2

Em 2016, foi instalado o segundo sistema INVELOX na Guarda Nacional do Exército em Michigan. A geração de energia eólica será de 100kW, com possibilidade de atualização para 500KW.

Figura 37 - Sistema 2 SheerWind INVELOX instalado na Guarda Nacional do Exército em Michigan



Fonte: *SheerWind*, 2016

Especificações da unidade:

- Altura do cubo = 7,9 m
- Altura total = 8,4 m
- Comprimento total = 21 m
- Ingestão $d = 5,5$ m
- Concentrador $d = 2,5$ m
- Venturi $d = 1$ m
- Difusor $d = 3,3$ m

5.7 EUA, Ilha de Palmyra

A ilha de Palmyra, localizada a 1.000 milhas ao Sul do Havaí, abriga recife de coral e ecossistemas de ilha tropical. Local remoto que não possui voos comerciais e é utilizado para pesquisas científicas. O sistema foi projetado para o *The Nature Conservancy*, com o propósito de carregar as baterias do local e reduzir o consumo de diesel. A instalação de sistemas solares, integrado ao sistema eólico INVELOX quase eliminarão o uso de combustíveis fósseis em *Palmyra Atoll*, o que acarretará a diminuição de 21.000 galões de combustível diesel usado usados anteriormente para gerar os geradores do atol. Como a ilha é lar de mais de 1 milhão de aves marinhas, a solução foi a mais propícia para preservar as espécies locais.

Figura 38 – Instalação do sistema INVELOX na Ilha de Palmyra, ao sul do Havaí.



Fonte: *SheerWind*, 2017

Especificações da unidade:

- Altura do cubo = 6 m
- Altura total = 10 m
- Comprimento total = 18,5 m
- Entrada D = 5,8 m
- Concentrador D = 5,8 m
- Venturi D = 3,0 m
- Difusor D = 8 m

6 CONCLUSÕES

O presente Trabalho de Conclusão de Curso teve o objetivo de apresentar as principais características do novo sistema de geração de energia eólica, analisando sua viabilidade técnica frente ao sistema convencional. Foi mostrado que o sistema INVELOX pode ser projetado para capturar e acelerar o ar usando uma ingestão omnidirecional e assim, gerar em até 300% mais energia que o sistema tradicional, sob as mesmas condições de uso.

A análise foi feita através da revisão bibliográfica existente sobre a temática, considerando simulações comparando os dois sistemas. De acordo com os estudiosos do assunto, o sistema INVELOX é viável tanto do ponto de vista técnico como econômico, devido ao seu grande potencial de geração, redução dos custos de operação e manutenção, assim como os impactos ambientais negativos mitigados ou minorados, se comparado às turbinas geradoras instaladas em grandes torres.

Diante do que foi exposto, esse novo dispositivo tem o potencial de expandir e viabilizar o uso da energia eólica, como alternativa ao uso dos combustíveis fósseis e tornar a matriz energética mundial cada vez mais sustentável. Em âmbito nacional, a tecnologia tem boas perspectivas, considerando a sua possibilidade de geração local e integração à rede elétrica existente. Devido ao imenso território, nosso país apresenta sistema de transmissão de energia insuficiente e com elevadas perdas, sendo um expressivo entrave para o mercado energético brasileiro.

Todavia, a tecnologia é ainda embrionária e precisa de mais estudos que enfatizem e comprovem sua viabilidade. Além disso, o custo inicial para aquisição da licença pode ser um entrave para a real expansão da tecnologia. Sendo assim, deve-se estudar alternativas para que a tecnologia seja viável para pequenos mercados, como pequenos agricultores, por exemplo, e não acessível somente para as grandes empresas e países que tenham condições de adquirir a licença para implementar o sistema.

REFERÊNCIAS

- AL-BAHADLY, Ibrahim; PETERSEN, A.F.T: A Ducted Horizontal Wind Turbine for Efficient Generation. **Intech Open**, Rijeka, Croatia, v. 4, n. 25, p. 622-643, abril. 2011.
- ALLAEI, Daryoush; ANDREOPOULOS, Yannis; TARNOWSKI, David. Invelox With Multiple Wind Turbines Generator Systems. **Energy**, New York, v. 69, n. 3, p. 1030-1040, outubro. 2015.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Resolução Normativa 482**. 17 de abril de 2012.
- A. Lothian, Percepções cênicas dos efeitos visuais de parques eólicos nas paisagens sul-australianas. *Geog Res*, 46 (2008), pp. 196-207
- ALLAEI, Daryoush; TARNOWSKI, David; ANDREOPOULOS, Yiannis. INVELOX with multiple wind turbine generator systems. **Energy**, v. 93, p. 1030-1040, 2015.
- ARNETT, Edward B.; BAERWALD, Erin F. Impacts of wind energy development on bats: implications for conservation. In: **Bat evolution, ecology, and conservation**. Springer New York, 2013. p. 435-456.
- BAKKER, Roel H. et al. Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress. **Science of the Total Environment**, v. 425, p. 42-51, 2012.
- BARRIOS, Luis; RODRIGUEZ, Alejandro. Behavioural and environmental correlates of soaring- bird mortality at on- shore wind turbines. **Journal of applied ecology**, v. 41, n. 1, p. 72-81, 2004.
- BERGEY, K. H. The Lanchester-Betz limit (energy conversion efficiency factor for windmills). **Journal of Energy**, v. 3, n. 6, p. 382-384, 1979.
- BINOPOULOS, E.; HAVIAROPOULOS, P. Environmental impacts of wind farms: myth and reality. **Cent. Renew. Energy Sources CRES**, 2006.
- CARRETE, Martina et al. Mortality at wind-farms is positively related to large-scale distribution and aggregation in griffon vultures. **Biological Conservation**, v. 145, n. 1, p. 102-108, 2012.

CESARIO, Francisco de et al. Identificação e caracterização de aspectos ambientais e avaliação de seus impactos durante a implantação de uma central geradora de energia eólica no estado de Sergipe. 2012.

CHAUDHARI, Chandan Dinkar; WAGHMARE, Sainath A.; KOTWAL, AshishP. Numerical Analysis Of Venturi Ducted Horizontal Axis Wind Turbine For Efficient Power Generation. **IJMCA**, v. 1, n. 6, p. 090-093, 2013.

COIMBRA, Claudia Maria. **Perspectiva de Inserção da Energia Eólica na Matriz Energética Nacional: Um Projeto Para a Eletrificação de Uma Vila Isolada – Análise Comparativa: Sistema Eólico x Sistema Diesel**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1999. 238 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

DANTAS DE FARIAS, Adriana Salete et al. CONTRIBUIÇÕES DE ECO-INOVAÇÕES PARA A GESTÃO AMBIENTAL DE ATIVIDADES PRODUTIVAS EM UM EMPREENDIMENTO DA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Brazilian Journal of Management/Revista de Administração da UFSM**, v. 9, n. 1, 2016.

DAVIS, Gray. A Roadmap for PIER Research on Avian Collisions with Wind Turbines in California. 2002.

DELUCCHI, Mark A.; JACOBSON, Mark Z. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies. **Energy policy**, v. 39, n. 3, p. 1170-1190, 2011.

DEVINE- WRIGHT, Patrick. Beyond NIMBYism: towards an integrated framework for understanding public perceptions of wind energy. **Wind energy**, v. 8, n. 2, p. 125-139, 2005.

DUTRA, Ricardo Marques. **Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica Face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2001. 309 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

EDENHOFER, Ottmar et al. (Ed.). **Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge University Press, 2011.

EVERAERT, Joris; STIENEN, Eric WM. Impact of wind turbines on birds in Zeebrugge (Belgium). **Biodiversity and Conservation in Europe**, p. 103-117, 2008.

Ferber R. Reações públicas a dispositivos de energia eólica. National Science Foundation e US Department of Energy, Outubro de 1977.

GARDNER, Paul et al. The impacts of increased levels of wind penetration on the electricity systems of the republic of Ireland and Northern Ireland: final report. **Garrad Hassan and Partners Limited**, p. 1-39, 2003.

GETTINBY, George et al. Strathprints Institutional Repository.

HODGE, B. Keith. **Alternative energy systems and applications**. John Wiley & Sons, 2017.

HYONG SIK, Kim; DYLAN DAH-CHUAN, Lu. Wind energy conversion system from electrical perspective—a survey. **Smart Grid and Renewable Energy**, v. 2010, 2010.

ICHINOSE, Masaya; FUTAMI, Motoo; SAKAI, Hiromitsu. **Wind power generation system**. U.S. Patent n. 7,692,325, 6 abr. 2010.

ISLAM, Mazharul; TING, David S.-K.; FARTAJ, Amir. Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 4, p. 1087-1109, 2008.

KATSAPRAKAKIS, Dimitris Al. A review of the environmental and human impacts from wind parks. A case study for the Prefecture of Lasithi, Crete. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 2850-2863, 2012.

KRÜGER, Eduardo Alexandre. Análise da viabilidade técnica de turbinas de vento canalizado na geração de energia eólica. 2016.

LANGBROEK, Martijn; VANCLAY, Frank. Learning from the social impacts associated with initiating a windfarm near the former island of Urk, The Netherlands. **Impact Assessment and Project Appraisal**, v. 30, n. 3, p. 167-178, 2012.

LIMA, Fátima; FERREIRA, Paula; VIEIRA, Filipa. Strategic impact management of wind power projects. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 25, p. 277-290, 2013.

LUCON, Oswaldo et al. Crise financeira, energia e sustentabilidade no Brasil. **estudos avançados**, v. 23, n. 65, p. 121-130, 2009.

MARTINOT, Eric et al. Renewable energy markets in developing countries. **Annual Review of Energy and the Environment**, v. 27, n. 1, p. 309-348, 2002.

MÜLLER, Simon; BROWN, Adam; ÖLZ, Samantha. Renewable energy: Policy considerations for deploying renewables. **Paris, France: International Energy Agency**, 2011.

NICK; PAYNE, James E. Renewable energy consumption and economic growth: evidence from a panel of OECD countries. **Energy policy**, v. 38, n. 1, p. 656-660, 2010.

PALUTIKOF, J. P.; COOK, H. F.; DAVIES, T. D. Effects of geographical dispersion on wind turbine performance in England: a simulation. **Atmospheric Environment. Part A. General Topics**, v. 24, n. 1, p. 213-227, 1990.

PEARCE- HIGGINS, James W. et al. The distribution of breeding birds around upland wind farms. **Journal of Applied ecology**, v. 46, n. 6, p. 1323-1331, 2009.

PEDERSEN, Eja; PERSSON WAYE, Kerstin. Perception and annoyance due to wind turbine noise—a dose–response relationship. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 116, n. 6, p. 3460-3470, 2004.

PICOLO, Ana Paula; RÜHLER, Alexandre J.; RAMPINELLI, Giuliano Arns. An approach to the wind energy as an alternative for teaching topics of classical physics. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 4, p. 01-13, 2014.

PREMALATHA, M. et al. Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 270-288, 2014.

SHEERWIND AG. **INVELOX Rx 2kW**. Chaska, MN: Sheerwind, 2016. 2 p. Catalog

SILVA, Neilton Fidelis. **Fontes de Energia Renováveis Complementares na Expansão do Setor Elétrico Brasileiro: O Caso da Energia Eólica**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2006. 263 p. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SLAWSKY, Lauren M. et al. Observed thermal impacts of wind farms over northern illinois. **Sensors**, v. 15, n. 7, p. 14981-15005, 2015.

SØRENSEN, Jens Nørkær. Aerodynamic aspects of wind energy conversion. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 43, p. 427-448, 2011.

TEXON, Meyer. The hemodynamic concept of atherosclerosis. **Bulletin of the New York Academy of Medicine**, v. 36, n. 4, p. 263, 1960.

THAYER, Robert L.; FREEMAN, Carla M. Altamont: public perceptions of a wind energy landscape. **Landscape and urban planning**, v. 14, p. 379-398, 1987.

WANG, Chien; PRINN, Ronald G. Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 4, p. 2053-2061, 2010.